

# Universidad Carlos III

Grado en Ingeniería Mecánica



## DISEÑO DE UNA PLANTA DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA PARA UN POLIDEPORTIVO EN EL ENTORNO CLIMÁTICO DE MADRID

---

*Autor: Luis Calero García*

*Tutor: Pedro Acisclo Rodríguez Aumente*



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

### Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer la colaboración prestada por el personal de dirección y mantenimiento del polideportivo Alfredo Di Stéfano, quienes han proporcionado los datos necesarios para la realización de este trabajo.

También quiero agradecer a mi tutor, Pedro, todo el tiempo, esfuerzo y ayuda que me ha dedicado durante el desarrollo del presente trabajo, ya que cuando he necesitado su opinión o conocimiento ha estado disponible y siempre dispuesto a colaborar. Además, he tenido la suerte de ser su alumno, precisamente en la asignatura que más se corresponde con la temática del proyecto, siendo inestimable su aporte para la adquisición del conocimiento necesario para el desarrollo del presente documento.

Además me gustaría hacer una mención especial a mis compañeros de clase a lo largo de la carrera, quienes de la noche a la mañana se convirtieron en parte significativa de mi día a día, y me han acompañado durante estos cuatro años en los momentos buenos y menos buenos, mientras asentaba las bases para llegar a ser un profesional algún día.

A mis amigos, quienes han soportado en muchas ocasiones mi dedicación a la carrera, ellos siempre me han servido de desahogo y vía de escape.

A mi familia, que siempre ha estado apoyándome y animándome durante esta etapa. Especialmente quiero dar las gracias a mi hermana por su paciencia infinita y a mi madre por hacer posible todo, dándome siempre lo que me ha hecho falta y confiando en mí.

Especialmente a Caro, quien me ha aguantado, animado, comprendido, escuchado, aconsejado, y sufrido más que nadie durante estos años, pero siempre ha estado allí en todo momento dándome fuerzas y cariño, motivándome y haciéndome sentir especial.

A todas las personas mencionadas directa o indirectamente, GRACIAS de todo corazón.

Finalmente quiero acabar dedicando este trabajo a mi padre, siempre presente en mis pensamientos, y a quien echo de menos, más si cabe, en momentos importantes y especiales como este. Allá donde estés, va por ti.



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

Este Trabajo Fin de Grado tiene un propósito exclusivamente académico, que se concreta en probar la capacidad de su autor para hacer aplicación y síntesis de los conceptos y técnicas aprendidos durante la realización de los estudios tendentes a la obtención del Título de Graduado en Ingeniería Mecánica de acuerdo a los requisitos de la UC3M. Por dicho motivo, no se autoriza su utilización por personal ajeno a la realización del mismo, no haciéndose ni su autor ni su director o tutor, responsables de los daños y perjuicios directos o indirectos que pudiera ocasionar la aplicación de los conceptos, técnicas, metodologías y/o resultados en él contenidos.



# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>13</b>
1.1	Objetivos del trabajo	13
1.2	Breve descripción del estado del arte	13
1.2.1	Estado energético nacional	13
1.2.2	Estado del sector solar térmico	17
1.3	Conceptos fundamentales	20
1.3.1	Procedencia de la energía solar	20
1.3.2	La medición de la energía del sol	22
1.4	Subsistemas de la instalación	25
1.4.1	Sistema de captación	25
1.4.1.1	Partes de un captador plano	27
1.4.1.2	Estado de los sistemas de captación a nivel mundial	28
1.4.2	Sistema de almacenamiento	29
1.4.3	Sistema hidráulico	30
1.4.3.1	Tuberías	30
1.4.3.2	Bombas	31
1.4.3.3	Vasos de expansión	31
1.4.3.4	Otros elementos	32
1.4.4	Sistema de intercambio	32
1.4.5	Sistema auxiliar	34
1.4.6	Sistema de control	35
1.5	Tipos de instalaciones	35
<b>2</b>	<b>Descripción de la instalación y demanda</b>	<b>38</b>
2.1	Descripción de la instalación ACS	38
2.2	Demanda de la instalación ACS	39
2.3	Ecuaciones para resolver el circuito de ACS	40
2.3.1.1	Balance de energía en los captadores	40
2.3.1.2	Balance en el intercambiador del circuito primario y secundario	41
2.3.1.3	Balance de energía en el sistema de almacenamiento	42
2.3.1.4	Fracción solar	43
2.4	Descripción de la instalación de la piscina	44
2.5	Demanda de la instalación de la piscina	45
2.6	Ecuaciones para resolver el circuito de la piscina	47
2.6.1.1	Balance de energía en los captadores	47
2.6.1.2	Balance en el intercambiador del circuito primario y secundario	48
2.6.1.3	Balance de energía en la piscina	49
2.6.1.4	Balance de energía en el sistema de almacenamiento	50
2.6.1.5	Fracción solar	51
<b>3</b>	<b>Cálculo de componentes de la instalación de ACS</b>	<b>52</b>
3.1	Cálculo del sistema de captación	52
3.1.1	Cálculo del área de captadores	53
3.1.2	Cálculo de pérdidas de radiación solar	59
3.1.2.1	Cálculo de pérdidas de radiación solar debido a sombras	60
3.1.2.2	Cálculo de pérdidas de radiación solar debido a inclinación y orientación de los captadores solares	63
3.1.3	Cálculo de la distribución de los captadores en el tejado y la distancia mínima entre filas	63



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

<b>3.2</b>	<b>Cálculo del sistema de acumulación</b>	<b>65</b>
3.2.1	Estudio de la capacidad de almacenamiento frente a la posible pérdida de fracción solar cubierta	65
<b>3.3</b>	<b>Cálculo del sistema de intercambio</b>	<b>68</b>
<b>3.4</b>	<b>Cálculo del disipador de energía</b>	<b>68</b>
<b>3.5</b>	<b>Cálculo del sistema hidráulico</b>	<b>70</b>
3.5.1	Descripción del sistema de tuberías	70
3.5.1.1	Circuito primario	70
3.5.1.2	Circuito secundario	72
3.5.2	Aislamiento	73
3.5.3	Cálculo de bombas de circulación	74
3.5.3.1	Cálculo de pérdidas de carga en tuberías	75
3.5.3.2	Cálculo de pérdidas de carga en intercambiadores	75
3.5.3.3	Cálculo de pérdidas de carga en colectores	76
3.5.4	Cálculo del vaso de expansión	78
<b>3.6</b>	<b>Cálculo del sistema auxiliar</b>	<b>81</b>
<b>3.7</b>	<b>Cálculo del sistema de control</b>	<b>83</b>
<b>4</b>	<b>Cálculo de componentes de la instalación de la piscina</b>	<b>84</b>
<b>4.1</b>	<b>Cálculo del sistema de captación</b>	<b>84</b>
4.1.1	Cálculo del área de captadores	84
4.1.2	Cálculo de pérdidas de radiación solar	85
4.1.3	Cálculo de la distribución de los captadores en el tejado y la distancia mínima entre filas	85
<b>4.2</b>	<b>Cálculo del sistema de acumulación</b>	<b>86</b>
<b>4.3</b>	<b>Cálculo del sistema de intercambio</b>	<b>86</b>
<b>4.4</b>	<b>Cálculo del sistema hidráulico</b>	<b>87</b>
4.4.1	Descripción del sistema de tuberías	88
4.4.1.1	Circuito primario	88
4.4.1.2	Circuito secundario	89
4.4.2	Aislamiento	90
4.4.3	Cálculo de bombas de circulación	90
4.4.3.1	Cálculo de pérdidas de carga en tuberías	90
4.4.3.2	Cálculo de pérdidas de carga en intercambiadores	91
4.4.3.3	Cálculo de pérdidas de carga en colectores	91
4.4.4	Cálculo del vaso de expansión	93
<b>4.5</b>	<b>Cálculo del sistema auxiliar</b>	<b>95</b>
<b>4.6</b>	<b>Cálculo del sistema de control</b>	<b>95</b>
<b>5</b>	<b>Análisis ambiental</b>	<b>96</b>
<b>5.1</b>	<b>Análisis de la instalación de ACS</b>	<b>96</b>
<b>5.2</b>	<b>Análisis de la instalación de la piscina</b>	<b>97</b>
<b>5.3</b>	<b>Ahorro global de emisiones de la instalación</b>	<b>99</b>
<b>6</b>	<b>Análisis económico</b>	<b>100</b>
<b>6.1</b>	<b>Presupuesto de la instalación ACS</b>	<b>100</b>
<b>6.2</b>	<b>Presupuesto de la instalación de la piscina</b>	<b>101</b>
<b>6.3</b>	<b>Viabilidad económica de la instalación</b>	<b>103</b>
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>107</b>
<b>7.1</b>	<b>Posibles alternativas para la instalación</b>	<b>108</b>



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

<b>8</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>109</b>
<b>9</b>	<b>Anexos</b>	<b>112</b>
<b>9.1</b>	<b>Programas de Mathcad utilizados</b>	<b>112</b>
9.1.1	Programa dimensionamiento del área y fracción solar de ACS	112
9.1.2	Programa dimensionamiento del área y fracción de la piscina	130
9.1.3	Programa dimensionamiento intercambiadores	147
9.1.4	Programa dimensionamiento pérdidas de carga en tuberías	152
<b>9.2</b>	<b>Documentación técnica de los elementos de la instalación</b>	<b>156</b>
9.2.1	Documentación técnica de los captadores planos	156
9.2.2	Documentación técnica de los intercambiadores	158
9.2.3	Documentación técnica de los acumuladores	159
9.2.4	Documentación técnica del fluido calo portador	160
9.2.5	Documentación técnica de los vasos de expansión	162
9.2.6	Documentación técnica de las bombas de circulación	163
9.2.7	Documentación técnica del disipador de energía	167



# Índice de Ilustraciones

<i>Ilustración 1 Gráfica de la evolución de la estructura de la energía final consumida en España desde el año 1990 hasta 2010. Referencia [4]</i>	13
<i>Ilustración 2 Evolución de la potencia instalada en España según fuentes energéticas. Referencia [4]</i>	14
<i>Ilustración 3 Gráfico de los diferentes escenarios de des carbonización propuestos por RoadMap 2050 Referencia [10]</i>	15
<i>Ilustración 4 Escenarios de la evolución del precio del barril de petróleo Brent. Referencia [4]</i>	16
<i>Ilustración 5 Estimación de la disminución de los costes de producción eléctrica a lo largo del tiempo. Referencia [4]</i>	17
<i>Ilustración 6 Potencia térmica solar en operación a nivel mundial en el año 2009 (captadores planos y de vacío). Referencia [4]</i>	18
<i>Ilustración 7 Evolución del sector térmico solar en España. Referencia [4]</i>	18
<i>Ilustración 8 Desglose de facturación del sector termo solar en España. Referencia [4]</i>	19
<i>Ilustración 9 Esquema simplificado de la estructura interna del Sol. Referencia [16]</i>	20
<i>Ilustración 10 Esquema de la órbita elíptica Terrestre respecto al Sol. Referencia [18]</i>	20
<i>Ilustración 11 Ángulo de declinación. Gráfico de su variación a lo largo del año. Referencia [28]</i>	21
<i>Ilustración 12 Variación del valor de la radiación extraterrestre a lo largo del año. Referencia [27]</i>	22
<i>Ilustración 13 Comparación entre la radiación emitida por el sol y la de un cuerpo negro perfecto a 5777K. Figura modificada tomada de Referencia [17]</i>	23
<i>Ilustración 14 Efectos atmosféricos sobre la radiación. Referencia [1]</i>	24
<i>Ilustración 15 Esquema básico de una instalación ACS con apoyo de energía solar. Figura modificada tomada de Referencia [20]</i>	25
<i>Ilustración 16 Captador Solar sin cubierta. Referencia [23]</i>	26
<i>Ilustración 17 Captador plano. Referencia [24]</i>	26
<i>Ilustración 18 Captador de tubos de vacío. Referencia [26]</i>	26
<i>Ilustración 19 Partes principales de un colector plano. Referencia [22]</i>	28
<i>Ilustración 20 Cuadro de resumen de los tipos de captadores. Figura modificada tomada de Referencia [4]</i>	28
<i>Ilustración 21 Capacidad mundial instalada por tipo de colector. Referencia [4]</i>	29
<i>Ilustración 22 Depósito con serpentín. Referencia [29]</i>	30
<i>Ilustración 23 Tubería de cobre con aislamiento. Referencia [30]</i>	31
<i>Ilustración 24 Bomba centrífuga. Referencia [31]</i>	31
<i>Ilustración 25 Vaso de expansión cerrado. Referencia [19]</i>	32
<i>Ilustración 26 Válvula de esfera para aislamiento, llenado o vaciado. Referencia [25]</i>	32
<i>Ilustración 27 Principio de trabajo de un intercambiador de placas. Referencia [35]</i>	33
<i>Ilustración 28 Intercambiador de número de placas variables. Referencia [33]</i>	34
<i>Ilustración 29 Caldera de gas. Referencia [33]</i>	34



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

<i>Ilustración 30 Centralita de control y regulación. Referencia [21]</i>	35
<i>Ilustración 31 Esquema de la instalación ACS</i>	38
<i>Ilustración 32 Gráfica de la demanda media mensual de agua caliente sanitaria</i>	40
<i>Ilustración 33 Balance de energía en el sistema de captación. Referencia [17]</i>	40
<i>Ilustración 34 Balance de energía en el intercambiador. Referencia [17]</i>	41
<i>Ilustración 35 Balance de energía en el acumulador. Referencia [17]</i>	42
<i>Ilustración 36 Esquema de distribución de temperaturas en la acumulación. Referencia [17]</i>	43
<i>Ilustración 37 Esquema de la piscina.</i>	44
<i>Ilustración 38 Gráfica de la demanda media de agua caliente para piscina</i>	45
<i>Ilustración 39 Balance de energía en el sistema de captación</i>	47
<i>Ilustración 40 Balance de energía en el intercambiador</i>	48
<i>Ilustración 41 Balance de energía en la piscina</i>	49
<i>Ilustración 42 Balance de energía en el vaso de compensación</i>	50
<i>Ilustración 43 Esquema de distribución de temperaturas en la acumulación. Figura modificada de referencia [17]</i>	50
<i>Ilustración 44 Tabla con los datos de temperaturas mínimas registradas en España. Referencia [7]</i>	52
<i>Ilustración 45 Porcentaje de propilenglicol en función de la temperatura de congelación. Referencia [37]</i>	53
<i>Ilustración 46 Zonas climáticas de España. Referencia [6]</i>	54
<i>Ilustración 47 Contribución solar mínima según consumos y zona climática. Referencia [6]</i>	54
<i>Ilustración 48 Gráfica de la variación de la fracción solar frente al ángulo de inclinación de los captadores</i>	58
<i>Ilustración 49 Gráfica de la variación de la Producción Total y Neta frente al ángulo de inclinación de los captadores</i>	58
<i>Ilustración 50 Gráfica de la variación del rendimiento medio anual frente al ángulo de inclinación de los captadores</i>	59
<i>Ilustración 51 Pérdidas límite exigibles por el CTE. Referencia [6]</i>	60
<i>Ilustración 52 Ilustración 1 Fotografía del tejado superior del polideportivo.</i>	60
<i>Ilustración 53 Esquema de los cuatro puntos y ángulos necesarios para la representación</i>	61
<i>Ilustración 54 Diagrama de trayectorias aparentes del sola y representación de las sombras proyectadas por el auditorio Padre Soler</i>	62
<i>Ilustración 55 Tabla de porcentaje de pérdidas para un ángulo de inclinación y acimutal concreto. Referencia [6]</i>	62
<i>Ilustración 56 Ecuación para hallar el porcentaje de pérdidas por inclinación y orientación. Referencia [6]</i>	63
<i>Ilustración 57 Esquema de separación entre filas y obstáculos. Referencia [7]</i>	64
<i>Ilustración 58 Expresión para dimensionado de almacenamiento. Referencia [6]</i>	65





## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

<i>Ilustración 59</i>	<i>Análisis simultáneo de la demanda horaria y la radiación solar recibida en un día despejado. Referencia [3]</i>	66
<i>Ilustración 60</i>	<i>Variación de la fracción solar cubierta frente al cociente entre el volumen de almacenamiento y el área de captadores. Referencia [3]</i>	66
<i>Ilustración 61</i>	<i>Gráfico extrapolado de las posibles pérdidas de fracción solar por falta de almacenamiento</i>	67
<i>Ilustración 62</i>	<i>Modelos de aerotermos. Referencia [34]</i>	69
<i>Ilustración 63</i>	<i>Esquema de distribución de captadores y tuberías en el tejado</i>	71
<i>Ilustración 64</i>	<i>Esquema de la sala de máquinas, parte ACS</i>	72
<i>Ilustración 65</i>	<i>Tabla de espesores de aislamiento mínimos para tuberías que discurren por el interior. Referencia [7]</i>	74
<i>Ilustración 66</i>	<i>Caída de presión en el colector en función del caudal. Referencia [36]</i>	76
<i>Ilustración 67</i>	<i>Contribución solar mínima para piscinas cubiertas según zona climática. Referencia [6]</i>	84
<i>Ilustración 68</i>	<i>Esquema de la sala de máquinas, parte de la piscina</i>	89
<i>Ilustración 69</i>	<i>Gráfica de la evolución del VAN a lo largo de la vida útil</i>	105
<i>Ilustración 70</i>	<i>Gráfico de la evolución del VAN con interés del 3,15%</i>	105
<i>Ilustración 71</i>	<i>Gráfico de la evolución de VAN a lo largo del año con un IPC alto</i>	106
<i>Ilustración 72</i>	<i>Gráfica de la proporción de radiación difusa y su correlación para tiempo solar verdadero</i>	116
<i>Ilustración 73</i>	<i>Gráfica de irradiación diaria total, difusa y modelo</i>	117
<i>Ilustración 74</i>	<i>Gráfica de la temperatura media ambiente diurna y la temperatura del agua de red a lo largo del año</i>	118
<i>Ilustración 75</i>	<i>Gráfica de la evolución de la demanda de agua caliente sanitaria a lo largo del año</i>	121
<i>Ilustración 76</i>	<i>Valores del rendimiento y la fracción solar a lo largo del año</i>	126
<i>Ilustración 77</i>	<i>Gráfica de la energía neta producida por la instalación y la demandada</i>	128
<i>Ilustración 78</i>	<i>Gráfica de la potencia térmica neta producida por la instalación y la demandada</i>	129
<i>Ilustración 79</i>	<i>Gráfica de la evolución de las temperaturas en distintos puntos de la instalación a lo largo del año</i>	129
<i>Ilustración 80</i>	<i>Gráfica de la energía neta producida por la instalación y la demandada</i>	145
<i>Ilustración 81</i>	<i>Gráfica de la potencia térmica neta producida por la instalación y la demanda</i>	145
<i>Ilustración 82</i>	<i>Gráfica de la evolución de las temperaturas en distintos puntos de la instalación a lo largo del año</i>	146
<i>Ilustración 83</i>	<i>Diagrama de Moody. Referencia [15]</i>	153
<i>Ilustración 84</i>	<i>Longitudes equivalentes de válvulas para diferentes diámetros. Referencia [2]</i>	154
<i>Ilustración 85</i>	<i>Variación de la densidad con la proporción de Agua y temperatura</i>	160
<i>Ilustración 86</i>	<i>Variación de la capacidad térmica específica con la proporción de Agua y temperatura</i>	160
<i>Ilustración 87</i>	<i>Variación de la conductividad térmica con la proporción de Agua y temperatura</i>	161
<i>Ilustración 88</i>	<i>Variación de la viscosidad cinemática con la proporción de Agua y temperatura</i>	161



# Índice de Tablas

Tabla 1 Metros cúbicos de agua caliente sanitaria	39
Tabla 2 Medias mensuales de metros cúbicos de agua caliente sanitaria	39
Tabla 3 Metros cúbicos de agua caliente para piscina	45
Tabla 4 Medias mensuales de metros cúbicos de agua caliente para piscina	45
Tabla 5 Condiciones climatológicas de la piscina	46
Tabla 6 Media de metros cúbicos diarios de agua de recirculación para cada mes	46
Tabla 7 Propiedades del fluido calo portador del circuito primario.	53
Tabla 8 Datos climatológicos de Leganés introducidos en el programa Mathcad para dimensionar ACS	55
Tabla 9 Coordenadas geográficas	55
Tabla 10 Características técnicas del captador	56
Tabla 11 Datos de la instalación variando el ángulo de inclinación Beta	56
Tabla 12 Configuración final de captadores ACS	59
Tabla 13 Valores angulares de los puntos representativos.	61
Tabla 14 Coeficientes usados en cada elemento diagrama de trayectorias aparentes	62
Tabla 15 Características del sistema de acumulación	67
Tabla 16 Datos del intercambiador comercial	68
Tabla 17 Resultados del intercambiador del circuito ACS	68
Tabla 18 Datos del aerotermo del circuito primario de ACS	70
Tabla 19 Características de los tramos de tubería del circuito primario de ACS	71
Tabla 20 Elementos del circuito primario ACS	72
Tabla 21 Características de los tramos de tubería del circuito secundario de ACS	73
Tabla 22 Elementos del circuito secundario ACS	73
Tabla 23 Espesores y longitudes de aislante para ACS	74
Tabla 24 Pérdidas de carga en conductos del circuito primario ACS	75
Tabla 25 Pérdidas de carga en conductos del circuito secundario ACS	75
Tabla 26 Pérdidas de carga intercambiador primario-secundario ACS	75
Tabla 27 Datos de las bombas del circuito primario y secundario de ACS	78
Tabla 28 Longitudes totales de tuberías en el circuito primario ACS	79
Tabla 29 Datos del vaso de Expansión ACS	81
Tabla 30 Datos introducidos en el programa Mathcad para dimensionar piscina	84
Tabla 31 Configuración final de captadores ACS	85
Tabla 32 Datos del intercambiador entre circuito primario y secundario para piscina	86
Tabla 33 Resultados del intercambiador entre circuito primario y secundario de la piscina	87
Tabla 34 Datos del intercambiador entre agua de entrada y desechada de la piscina	87



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

Tabla 35 Resultados del intercambiador entre agua de entrada y desechada de la piscina	87
Tabla 36 Características de los tramos de tubería del circuito primario para la piscina	88
Tabla 37 Elementos del circuito primario para la piscina	88
Tabla 38 Características del tramo de tubería del circuito secundario de la piscina	89
Tabla 39 Elementos del circuito secundario de la piscina	89
Tabla 40 Espesores y longitudes de aislante para la piscina	90
Tabla 41 Pérdidas de carga en conductos del circuito primario de la piscina	90
Tabla 42 Pérdidas de carga en conductos del circuito secundario en la piscina	91
Tabla 43 Pérdidas de carga intercambiador primario-secundario de la piscina	91
Tabla 44 de las bombas del circuito primario y secundario de la piscina	92
Tabla 45 Longitudes totales de tuberías en el circuito primario de la piscina	93
Tabla 46 Datos del vaso de expansión circuito de piscina	95
Tabla 47 Potencia térmica suministrada por la instalación ACS durante un año	96
Tabla 48 Potencia térmica suministrada por la instalación de la piscina durante un año	97
Tabla 49 Potencia térmica ahorrada en el intercambiador durante el año	98
Tabla 50 Presupuesto del sistema de captación ACS	100
Tabla 51 Presupuesto del sistema de acumulación ACS	100
Tabla 52 Presupuesto del sistema de intercambio ACS	100
Tabla 53 Presupuesto del sistema de disipación ACS	100
Tabla 54 Presupuesto del sistema hidráulico ACS	101
Tabla 55 Presupuesto del sistema de captación Piscina	101
Tabla 56 Presupuesto del sistema de intercambio Piscina	101
Tabla 57 Presupuesto del sistema hidráulico Piscina	102
Tabla 58 Costes indirectos de la instalación	102
Tabla 59 Coste final de la instalación	102
Tabla 60 VAN estimado a lo largo de la vida útil	104
Tabla 61 Días medios de cada mes.	114
Tabla 62 Caudal volumétrico medio diario para cada mes	120
Tabla 63 Gastos máxicos medios mensuales de ACS a lo largo del año	121
Tabla 64 Valor del rendimiento medio mensual	125
Tabla 65 Potencia térmica suministrada por la instalación para un día medio del mes	126
Tabla 66 Fracción solar	127
Tabla 67 Potencia térmica demandada para cada día característico del mes	127
Tabla 68 Diferencias de temperaturas en el agua de entrada y salida	131
Tabla 69 Temperaturas del agua de entrada a la piscina	132
Tabla 70 Potencia térmica intercambiada	133
Tabla 71 Valores del rendimiento a lo largo del año	143
Tabla 72 Potencia térmica suministrada por la instalación para cada día típico del mes	143



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

<i>Tabla 73 Fracción solar cubierta</i>	<i>144</i>
<i>Tabla 74 Potencia térmica demandada por la instalación para un día medio de cada mes</i>	<i>144</i>
<i>Tabla 75 Valores de C y m para la correlación de la pérdida de carga en el intercambiador de placas.</i>	
<i>Referencia [13]</i>	<i>151</i>

### 1 Introducción

#### 1.1 Objetivos del trabajo

El objetivo del trabajo es dimensionar una instalación termo solar para cubrir las demandas de agua caliente sanitaria y climatización del agua de piscina, en un polideportivo dentro del entorno climático de Madrid, cumpliendo con todos los requisitos exigidos por la normativa vigente, principalmente el Código Técnico de la Edificación y el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Se realizará también un análisis económico y ambiental de la misma.

Los datos de consumos de agua utilizados para la realización del presente trabajo han sido obtenidos del polideportivo Alfredo Di Stéfano de la universidad Carlos III, situado en Leganés. Si bien es cierto que el centro ya cuenta con instalación termo solar, a la hora de realizar los cálculos se ha supuesto que toda la demanda estaba siendo cubierta mediante calderas de gas.

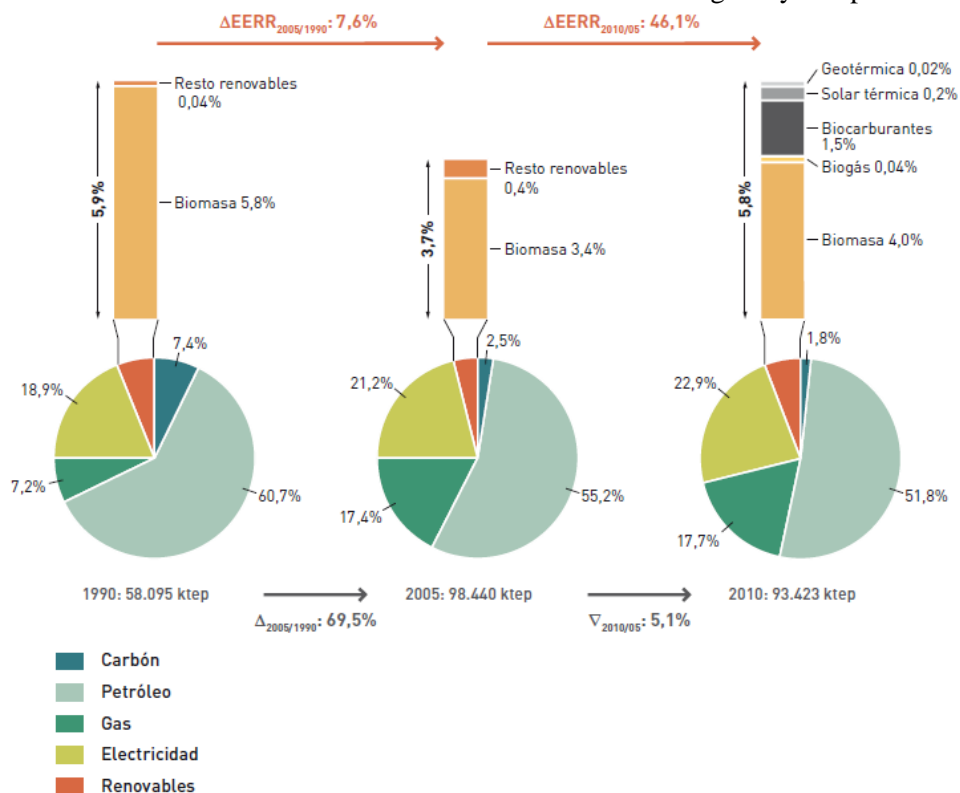
#### 1.2 Breve descripción del estado del arte

En esta sección se intentará resumir brevemente el estado energético y el panorama del sector térmico en España.

##### 1.2.1 Estado energético nacional

Dado que el proyecto apuesta por una fuente renovable, alternativa a las tradicionales para la producción de calor en aplicaciones de baja temperatura, es interesante ver la evolución de las proporciones de energía final consumida en España por sectores.

Tanto a nivel nacional, como en el panorama mundial, está clara la fuerte dependencia de combustibles fósiles a la hora de obtener energía y/o producir electricidad.



**Ilustración 1 Gráfica de la evolución de la estructura de la energía final consumida en España desde el año 1990 hasta 2010. Referencia [4]**

Mientras que el porcentaje total de combustibles fósiles ha descendido, ha aumentado la demanda casi dos veces en los últimos 20 años, luego siendo menos porcentaje es muy superior la cantidad importada actualmente que en los años 90.

Como se puede ver, el porcentaje de productos derivados del petróleo y gas natural dentro de la energía final consumida en España abarca más del 70% del total. Ciertamente, es impensable un cambio radical en la distribución de los porcentajes de las diferentes fuentes a corto plazo, pero si sería adecuada una actuación a medio plazo sobre ésta. Aclarar que el término relativo a electricidad no contempla en el gráfico el porcentaje de energía renovable durante su producción.

La última publicación referente al panorama energético del gobierno de España en el año 2011 fue el Plan de Energías renovables 2010-2020 en el cual se ofrece una visión de las acciones y actuaciones a implantar en esta década.

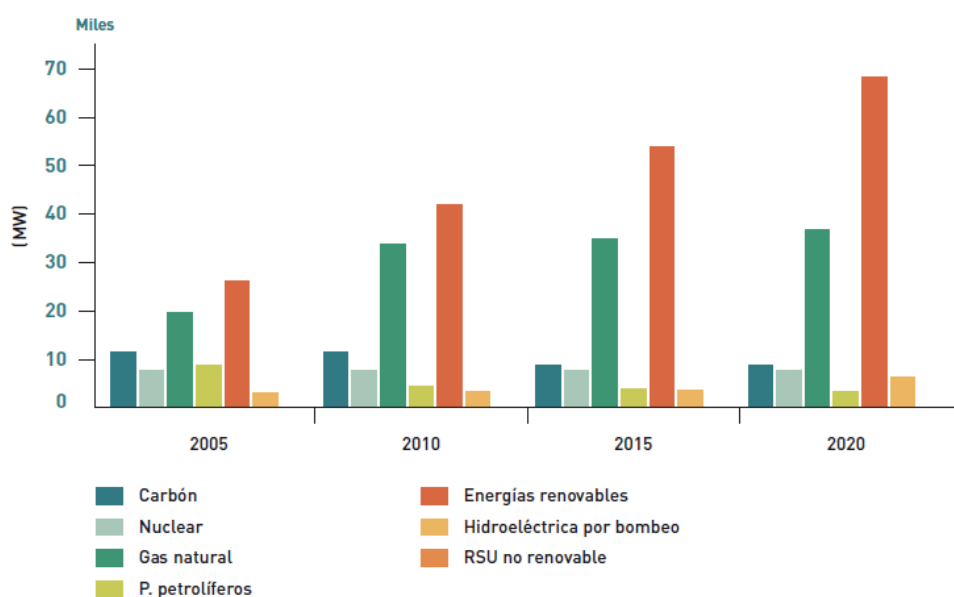
A nivel europeo, las acciones que se quieren llevar a cabo vienen especificadas en la directiva 2009/28/CE, cuya aplicación a nivel nacional está recogida en el documento antes mencionado. En dicha directiva se proponen tres objetivos básicos a cumplir antes de 2020:

- Incremento de la eficiencia energética hasta un 20%
- Contribución de las energías renovables del 20%
- Reducción de la emisión de gases de efecto invernadero un 20%

Básicamente lo que se pretende implantar es una producción de energía y electricidad mucho más diversificada, en el que el equilibrio entre los diferentes sectores sea la máxima a lograr.

Debido a que las energías renovables tienen la desventaja en su producción, que está totalmente influida por el clima en muchos casos, es necesario diversificar a su vez la procedencia de las mismas. De forma, que sean cuales sean las condiciones un determinado día del año, se tengan suficientes recursos para hacer frente a la demanda de ese día.

Aumentando la contribución de éste tipo de tecnologías para cubrir la demanda de energía final y/o producción de electricidad, también se está logrando mejorar el grado de autoabastecimiento del País, teniendo con ello beneficios económicos y/o políticos.



**Ilustración 2 Evolución de la potencia instalada en España según fuentes energéticas. Referencia [4]**

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

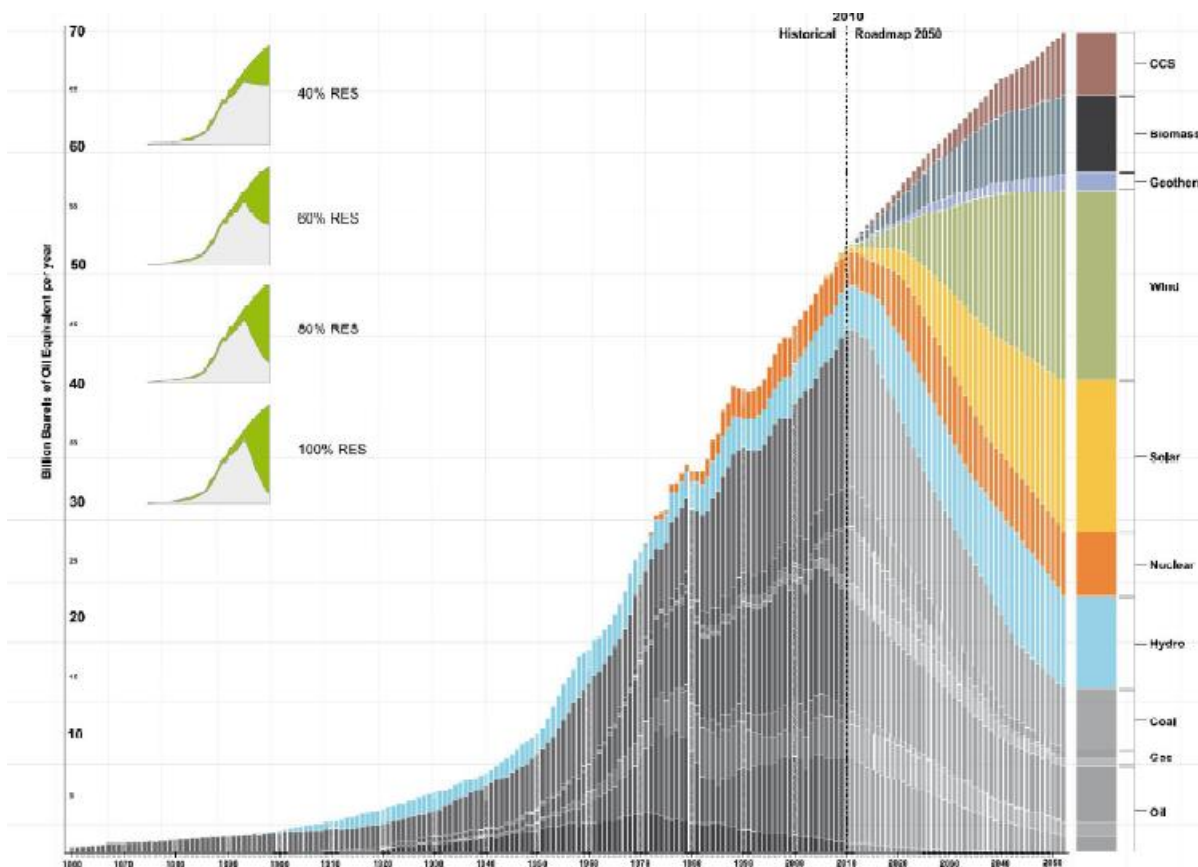
Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

La gráfica anterior es un ejemplo ilustrado de la posible distribución por sectores energéticos tras la aplicación de la directiva europea en nuestro país.

El aumento de la eficiencia energética que se quiere implantar se tiene que lograr mejorando el rendimiento actual y futuro de las aplicaciones, instalaciones, fuentes, explotaciones o sistemas, reduciendo los excesos de demanda y ahorrando en la medida de lo posible gastos innecesarios.

Por otro lado, la reducción de gases de efecto invernadero es probablemente el objetivo más ambicioso y difícil de conseguir de los tres propuestos, principalmente porque aunque se están desarrollando sistemas alternativos, los tradicionales son mayoría en sectores tan importantes como el transporte o la producción de electricidad. No obstante, debido a su importancia y a la conciencia medioambiental de la sociedad, posiblemente se persiga una reducción de hasta el 30%.

Aunque no forma parte de la directiva Europea, es interesante mencionar el estudio RoadMap2050. Fue encargado en el año 2009, después de una comisión conjunta de líderes europeos y el G8, quienes se comprometieron a reducir los niveles de gases de efecto invernadero a niveles de incluso un 90% menos que los medidos en el año 1990. Para estudiar la viabilidad de la propuesta encargaron ese trabajo, del cual podemos destacar algunos puntos.



**Ilustración 3 Gráfico de los diferentes escenarios de des carbonización propuestos por RoadMap 2050**  
Referencia [10]

Se proponen tres escenarios diferentes según el porcentaje de energía renovable del total disponible. Según estos escenarios, se grafica la evolución que deben sufrir las diferentes fuentes de energía. Además se sugiere un estado alternativo en el cuál toda la energía es renovable y sin aporte nuclear.



Más allá de cualquier estudio, mejor o peor elaborado, la tendencia general está clara y se camina en una única dirección, el cambio paulatino del modelo energético global.

Otra de las iniciativas propuestas en este estudio es la elaboración de una gran red de distribución energética, que vaya desde los países con más potencial solar, como por ejemplo España, hacia el resto de Europa, logrando así algo similar al modelo de exportación eléctrico francés, pero con energía renovable, consiguiendo con ello beneficios económicos y medioambientales.

Debido a que la demanda energética sigue aumentando año tras año, mientras que las reservas de petróleo y gas natural, pilar básico en el que se basan todos los países para satisfacer sus necesidades, descienden a un ritmo considerable, no es difícil suponer un aumento drástico del precio de los combustibles en un futuro medianamente cercano. Esto provocaría un aumento en la implantación de otros sistemas alternativos para cubrir esa demanda, económicamente más rentables y medioambientalmente más respetuosos. Siguiendo este razonamiento, si se quiere reducir el horizonte temporal necesario para igualar costes de sistemas tradicionales y renovables, es necesario impulsar cuanto antes las energías alternativas para aumentar su competitividad.

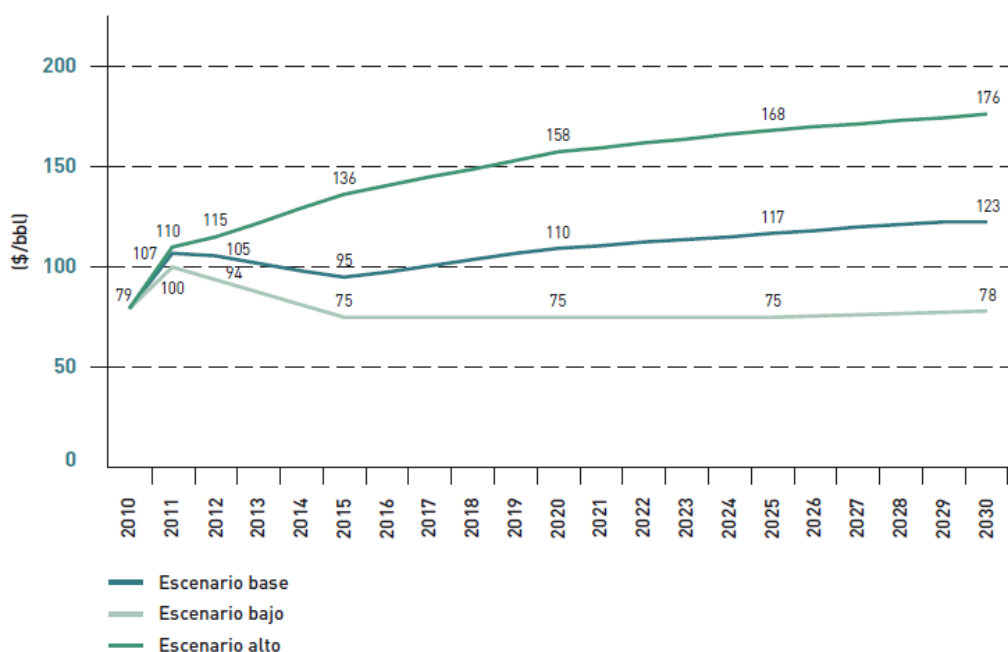
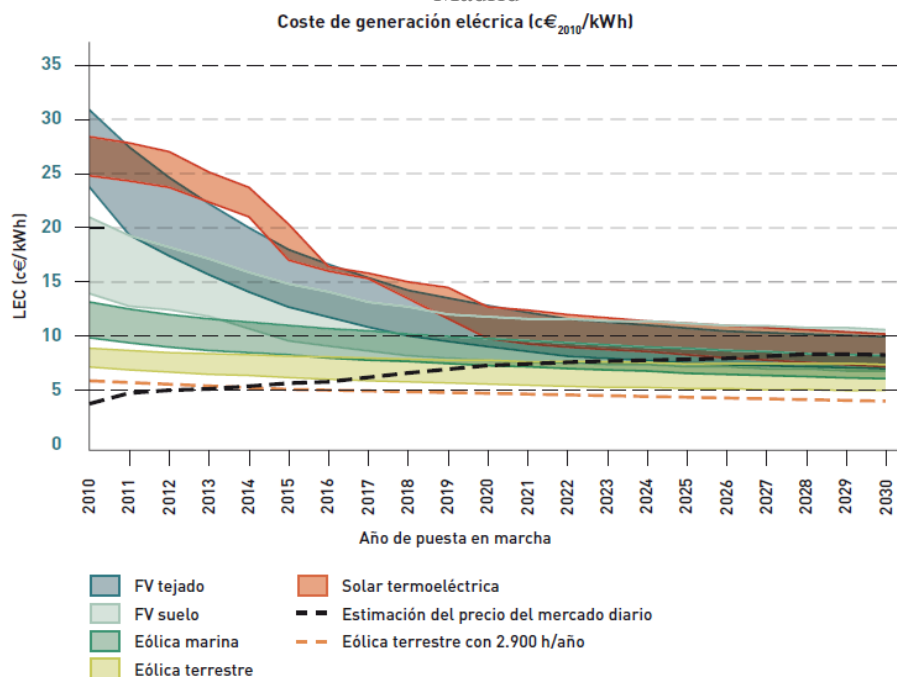


Ilustración 4 Escenarios de la evolución del precio del barril de petróleo Brent. Referencia [4]

Para tener una visión más clara de cómo afecta a la reducción de coste el desarrollo de una tecnología se introduce el siguiente gráfico:





**Ilustración 5 Estimación de la disminución de los costes de producción eléctrica a lo largo del tiempo. Referencia [4]**

Si bien es cierto que aún queda mucho por cambiar y mejorar, una ventaja es que también existen muchos frentes a través de los cuales lograr esa mejora. Uno de ellos es el sector solar térmico, en el cual se basa este trabajo.

### 1.2.2 Estado del sector solar térmico

Esta fuente consiste en aprovechar la energía solar disponible para generar energía térmica mediante el calentamiento de un fluido. Las tres áreas más grandes implantadas en nuestro país y a nivel mundial son:

- Aplicaciones de agua caliente sanitaria (ACS) calefacción y piscinas.
- Aplicaciones para usos industriales.
- Aplicaciones de climatización solar.

Dentro de las tres, la que supone mayor volumen de negocio en España es la primera, ya que desde la entrada en vigor del código técnico de la edificación es obligatoria su instalación y/o implantación viviendas de nueva construcción y rehabilitadas. Cabe añadir que es el sector en el que se encuentra el presente trabajo.

A nivel mundial, la potencia instalada era de 172.4 GW térmicos en el año 2009. Si bien es cierto a que a partir del año 2008 se sufre una reducción del ritmo de crecimiento, actualmente la potencia instalada será mayor, aunque no se disponen de datos. Los metros cuadrados correspondientes a esa potencia son unos 246 millones.

La gran mayoría de la potencia es producida mediante captadores vidriados planos y tubos de vacío, unos 151.5 GW térmicos, mientras que los 19.7 GW térmicos restantes corresponden a captadores no vidriados.

El líder por cantidad de vatios térmicos instalados en captadores planos y tubos de vacío es China, seguida por Europa.

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

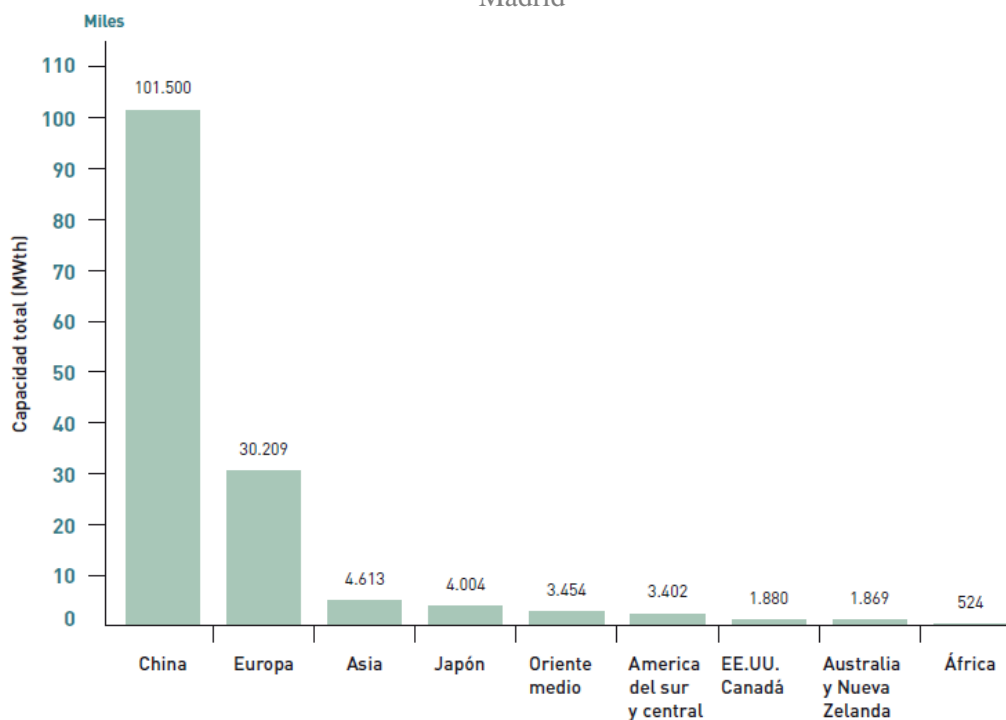


Ilustración 6 Potencia térmica solar en operación a nivel mundial en el año 2009 (captadores planos y de vacío). Referencia [4]

Cabe decir que en Europa y Asia son más frecuentes las instalaciones de ACS usando captadores planos y de vacío, mientras que en Estados Unidos y Australia la aplicación más frecuente es el calentamiento de piscinas mediante captadores no vidriados.

En nuestro país, la evolución del sector está reflejada en la siguiente gráfica:

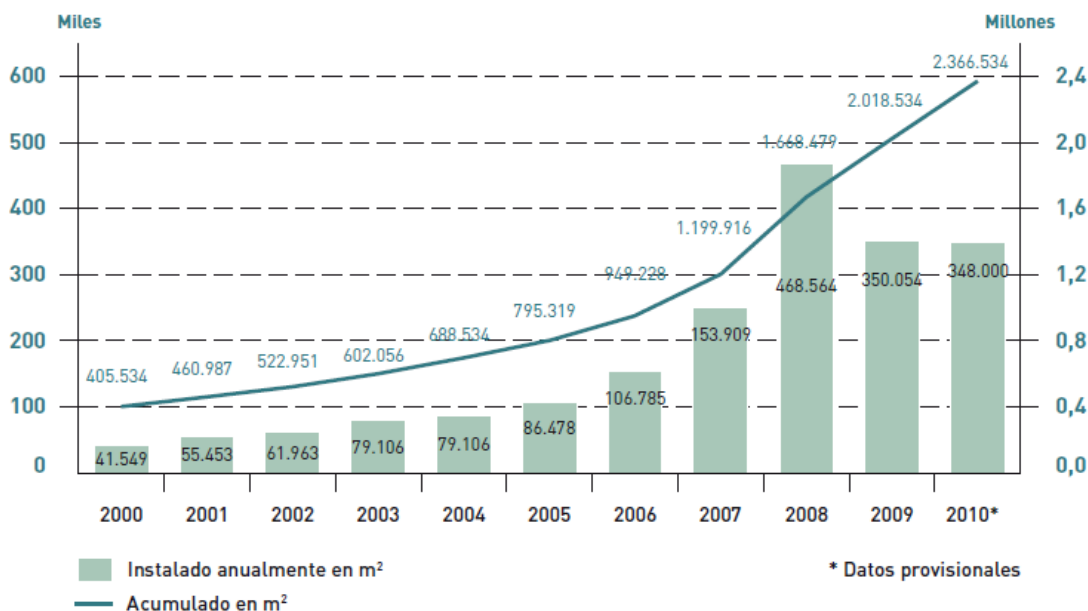


Ilustración 7 Evolución del sector térmico solar en España. Referencia [4]

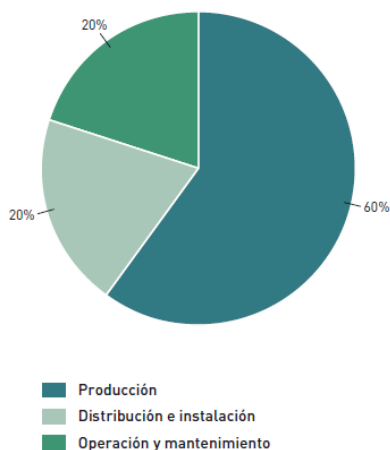
## TRABAJO DE FIN DE GRADO

### Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

A nivel europeo España es el segundo mercado más potente del sector, el cual, lleva creciendo constantemente desde el año 2000, si bien es cierto que tuvo su punto álgido en 2008. Ese año se llegó a un total de 468.654 metros cuadrados de superficie de paneles para una potencia térmica cercana a los 328MW térmicos, moviendo una cantidad estimada de dinero superior a 375 millones de euros entre distribuidores, fabricantes e instaladores nacionales e internacionales. Parte de estas cifras se explican por la bonanza económica y la buena salud del mercado de viviendas en los años anteriores. Desde el año 2009 el sector sufre ligeros descensos de volumen de negocio, básicamente debido al también descenso de viviendas de nueva construcción. No obstante, como el código técnico incluye en las obras de rehabilitación de viviendas la obligatoriedad de cumplir con la fracción mínima solar, el futuro del sector sigue asegurado.

Hasta el presente año, las instalaciones termo solares eran apoyadas por la administración pública mediante subvenciones a la inversión. Éstas eran financiadas por la comunidad autónoma y la administración general conjuntamente. Actualmente y debido a la situación económica que atraviesa el país, las primas a las energías renovables fueron retiradas siendo aún incierta su futura reposición.

Con el siguiente gráfico vemos la distribución de la facturación del sector



**Ilustración 8** Desglose de facturación del sector termo solar en España. Referencia [4]

En España el 98% de las aplicaciones que se desarrollan son para agua caliente sanitaria, en las cuales el 90% usan colectores planos.

Para los próximos años se prevé siempre un aumento significativo del volumen de negocio, ya que a pesar de la situación económica mantenida durante los últimos años, a largo plazo se garantiza el crecimiento al estar el sector incluido dentro de las energías renovables, las cuales serán una de las principales inversiones en el futuro más inmediato.

### 1.3 Conceptos fundamentales

#### 1.3.1 Procedencia de la energía solar

Toda la energía aprovechable para el sistema, que es recibida en la tierra, tiene su origen en el Sol. Como simplificación, puede considerarse que es una gigantesca esfera de gases a elevada temperatura, de la que nos llega radiación a la tierra debido a la temperatura que tiene su capa más superficial, la Fotosfera. Según métodos de cálculo indirecto, se puede concluir que la temperatura de esa superficie está en torno a 5800K.

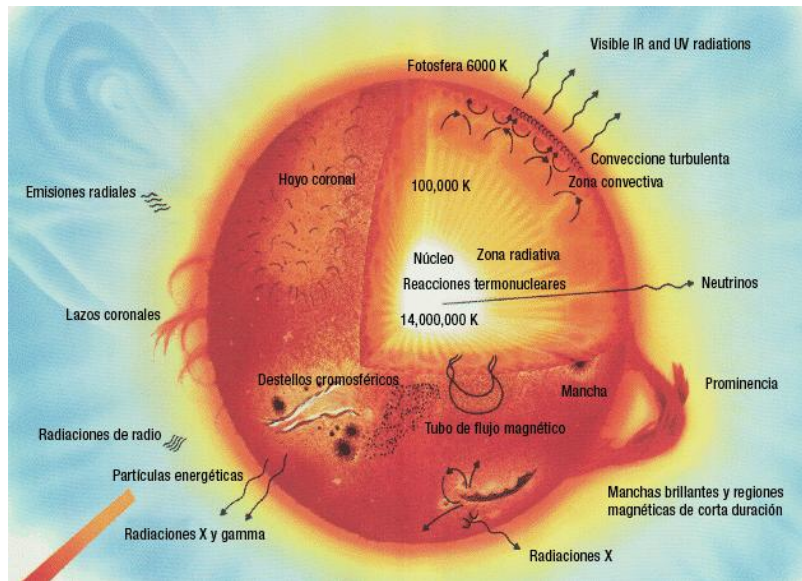


Ilustración 9 Esquema simplificado de la estructura interna del Sol. Referencia [16]

El sol tiene un diámetro de  $1.39 \cdot 10^9$  m y en su núcleo se producen reacciones de fusión de Hidrógeno en Helio, pudiéndose alcanzar temperaturas de  $14 \cdot 10^6$  K, liberando gran cantidad de energía y emitiendo rayos  $\gamma$  y  $\chi$ , que debido a los procesos de convección y radiación entre capas, se van desplazando a longitudes de onda mayores.

La tierra respecto al Sol realiza una órbita elíptica de baja excentricidad como la que puede verse en la ilustración:

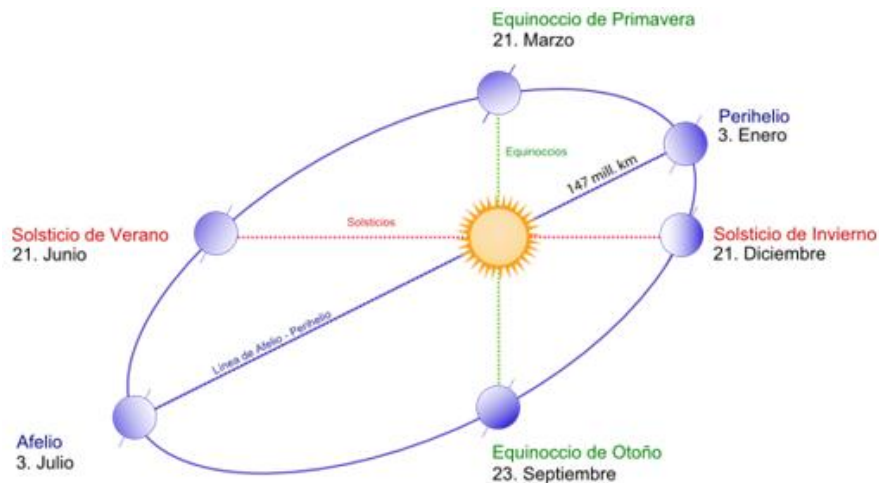
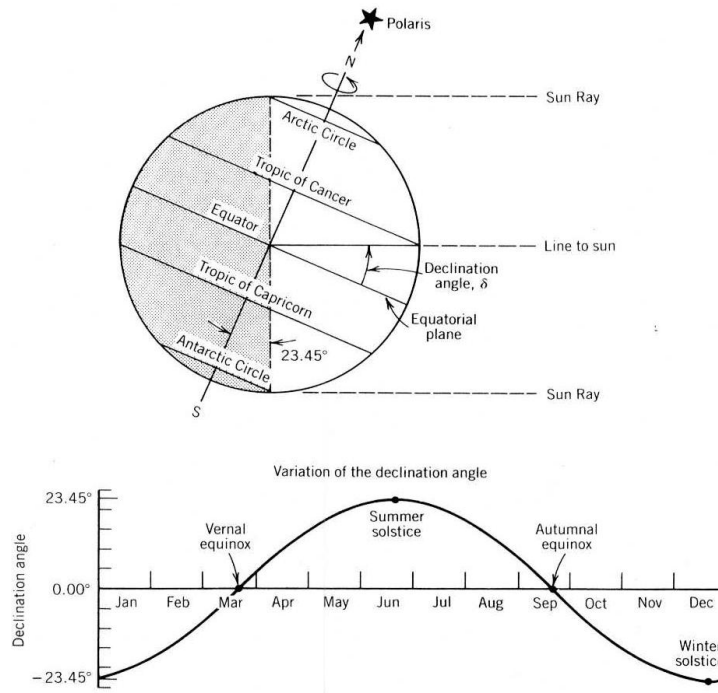


Ilustración 10 Esquema de la órbita elíptica Terrestre respecto al Sol. Referencia [18]

La distancia máxima entre los dos se da cuando la Tierra está en el afelio y es aproximadamente  $1.52 \cdot 10^{11}$  metros, mientras que la mínima dada en el perihelio es  $1.47 \cdot 10^{11}$  metros. El ángulo subtendido que abarca el Sol visto desde la tierra es de  $32^\circ$ .

La radiación procedente de la estrella que llegue a la superficie terrestre se verá influida por la distancia, pero no será el factor más determinante. El ángulo formado por el eje de la tierra y el plano que contiene a la órbita con el sol es culpable de la gran variabilidad de energía recibida en la tierra durante el año. Éste fenómeno a su vez es el causante de las estaciones, por ejemplo, y técnicamente se denomina ángulo de declinación.



**Ilustración 11 Ángulo de declinación. Gráfico de su variación a lo largo del año. Referencia [28]**

Como se aprecia, el valor del ángulo cambia diariamente según la Tierra describe la órbita solar, manteniéndose siempre entre  $\pm 23.45^\circ$ . Los cuatro puntos representativos del año para el hemisferio norte ocurren cuando el ángulo es máximo, mínimo y 0, que corresponden al solsticio de verano, invierno y equinoccios de primavera y otoño respectivamente. Existe una fórmula matemática para describir el ángulo en función del día del año y más adelante se hará uso de la misma.

$$\delta(n) = 23.45 \cdot \left( \sin \left( \frac{360 \cdot (284 + n)}{365} \right) \right)$$

Siendo

- $\delta$  el valor del ángulo de declinación para un día  $n$ .

- $n$  el número del día del año en el que se quiere conocer el valor del ángulo de declinación.

### 1.3.2 La medición de la energía del sol

Una vez explicada la posición entre ambos cuerpos celestes es interesante conocer qué es lo realmente medido u obtenido del sol. Se habla pues de la radiación solar, que es la energía por unidad de superficie que emite la estrella. Para concretar hay que hacer una primera distinción de la energía recibida, a nivel extraterrestre y a nivel terrestre.

A nivel extraterrestre se introduce el término constante solar. Ésta es la cantidad de energía por unidad de tiempo que atraviesa una superficie perpendicular a los rayos emitidos por la estrella, a una distancia media entre el Sol y la Tierra. Debido a que la órbita no es circular, el valor usado será el supuesto para la distancia media entre el afelio y el perihelio.

A lo largo de los años se ha ido afinando el valor obtenido, según se iban usando métodos más precisos. Actualmente el valor de la constante solar es de  $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ .

A partir de esta y teniendo en cuenta las distancias de la órbita elíptica, se puede deducir el valor de irradiancia del sol fuera de la atmósfera terrestre para cualquier día del año. Se sabe que el sol no siempre emite la misma cantidad de energía, pero ingenierilmente se puede hacer la suposición de que sí.

La fórmula que aproxima la variación de la cantidad de irradiancia extraterrestre recibida a lo largo del año es la siguiente, y como se observa en la gráfica el valor cambia según el día del año.

$$G_0(n) = 1367 \cdot \left( 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right)$$

Siendo

-  $G_0$  el valor de la irradiancia para un día  $n$ .

-  $n$  el número del día del año en el que se quiere conocer el valor del ángulo de declinación.

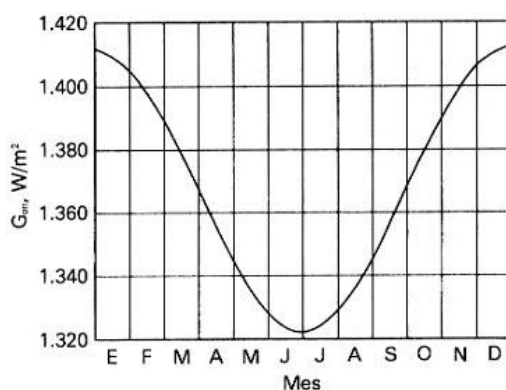


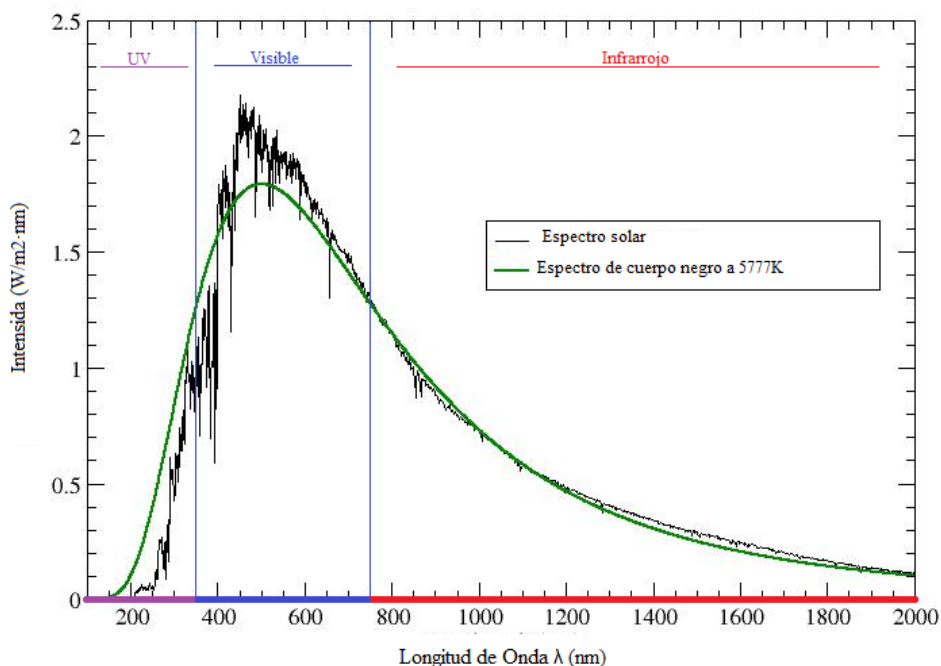
Ilustración 12 Variación del valor de la radiación extraterrestre a lo largo del año. Referencia [27]

La aproximación tiene un error menor a 0.3%, luego es bastante precisa.

La radiación extraterrestre emitida por el sol puede asemejarse a la de un cuerpo negro perfecto entorno a 5777K, dando lugar a la siguiente descomposición espectral:



### Espectro solar medido VS Espectro cuerpo negro



**Ilustración 13 Comparación entre la radiación emitida por el sol y la de un cuerpo negro perfecto a 5777K.**  
Figura modificada tomada de Referencia [17]

De la descomposición de la radiación según la longitud de onda se ve que prácticamente la totalidad pertenece al espectro visible e infrarrojo, siendo estos además los únicos espectros aprovechables para ser captados mediante las superficies absorbentes.

En cuanto a la irradiancia terrestre, se dan dos fenómenos que afectan a la misma:

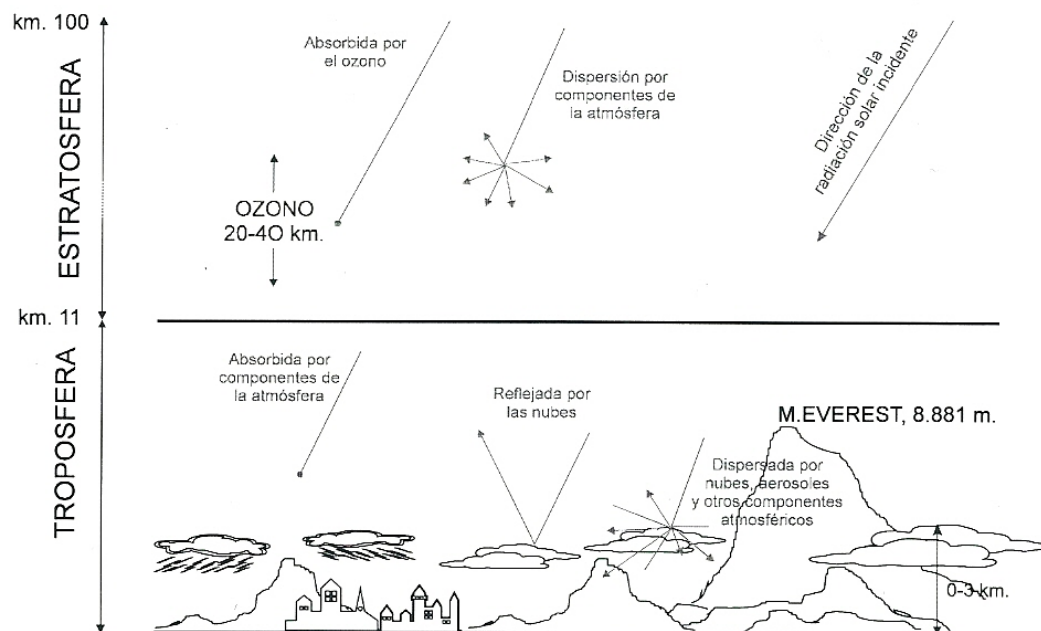
En primer lugar se da la absorción, es decir, parte de la radiación queda absorbida por la atmósfera. Como ejemplo ilustrativo, el ozono tiende a absorber la radiación con longitudes de onda corta, ultravioleta, mientras que con las infrarrojas hace lo propio el agua o el dióxido de carbono.

El otro fenómeno es la dispersión, que ocurre cuando la radiación directa es obstaculizada por nubes, polvo en suspensión, moléculas de aire etc. y sufre una variación de la dirección de incidencia, pasando a ser radiada en todas direcciones, siendo esta llamada radiación difusa.

Por lo tanto es evidente que la energía que finalmente se puede aprovechar es menor que la emitida en un principio.

Dentro de la atmósfera, se puede hacer una clasificación de la radiación aprovechable para los captadores en tres grupos diferenciados:

- Radiación directa, directamente del Sol con un determinado ángulo de incidencia.
- Radiación difusa, creada por fenómenos de difusión y emitida en todas direcciones.
- Radiación reflejada, creada a partir del reflejo de la luz en el suelo y/o otros objetos.



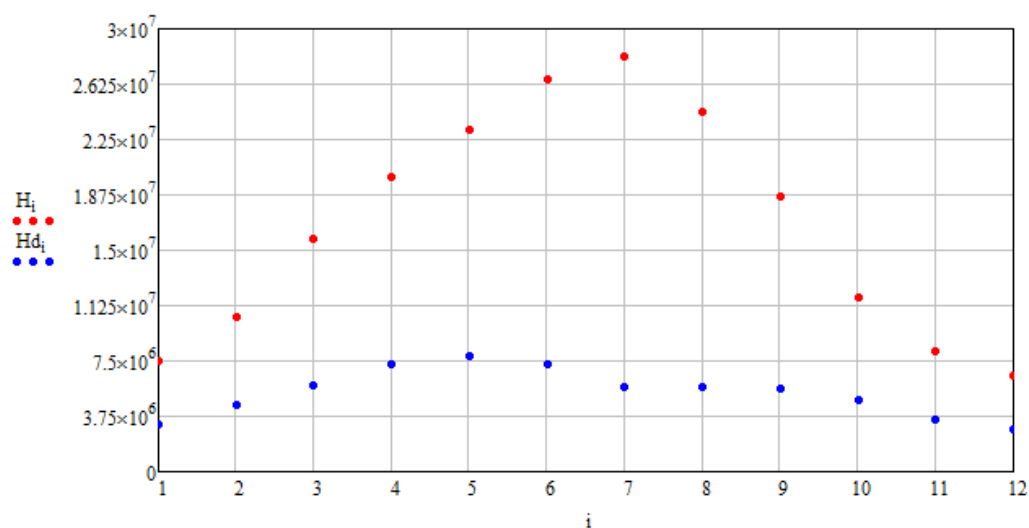
**Ilustración 14 Efectos atmosféricos sobre la radiación. Referencia [1]**

Aunque la radiación directa y la difusa no tienen la misma composición, se hace la aproximación ingenieril de que son iguales, la cual es válida para todos los cálculos.

Para el diseño de las instalaciones solares, será necesario establecer la cantidad de energía disponible para la ubicación deseada. Como se ha visto, son muchos los factores que minimizan la cantidad de energía que llega hasta la superficie terrestre.

Para cuantificar la energía disponible se recurre a los valores de irradiación terrestre. El término irradiación no es más que el valor de la irradiación integrado en un horizonte temporal concreto, pudiendo ser una hora si se habla de irradiación horaria ( $I$ ), o un día si se habla de irradiación diaria ( $H$ ).

Para la localización concreta del polideportivo, los datos de irradiación media diaria a nivel del suelo en un plano horizontal son los que se muestran en la siguiente gráfica, y en los cuales se basará el cálculo de la presente instalación.



**Ilustración 15 Gráfica de la Irradiación media diaria a lo largo del año para la ubicación del polideportivo**



Siendo

- $H_i$  el valor medio de irradiación global recibida ( $J/m^2$ ) en cada mes  $i$ , a lo largo de un año.

- $H_{di}$  el valor medio de irradiación difusa recibida ( $J/m^2$ ) en cada mes  $i$ , a lo largo de un año.

La irradiación difusa será un porcentaje medio de la global, el cual varía cada mes.

### 1.4 Subsistemas de la instalación

Se va a realizar una corta descripción de los principales sistemas que componen una instalación termo solar, destacando en algunos casos la solución que se implantará en la presente aplicación. En la siguiente ilustración aparecen todos los subsistemas, elementos y circuitos hidráulicos típicos de las instalaciones de ACS con apoyo de energía solar:

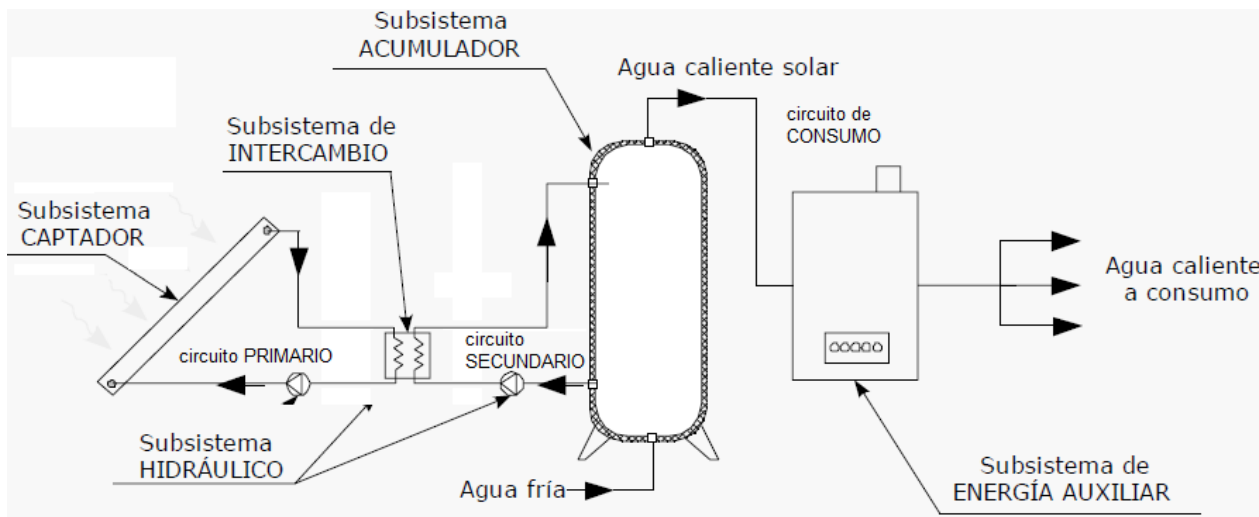


Ilustración 16 Esquema básico de una instalación ACS con apoyo de energía solar. Figura modificada tomada de Referencia [20]

#### 1.4.1 Sistema de captación

El colector solar es el elemento fundamental de la instalación ya que se encarga de captar la radiación solar para su aprovechamiento. En este trabajo se describen los colectores de baja temperatura, ya que son los más adecuados al tratarse de una instalación para agua caliente sanitaria con climatización de piscina.

Existen tres tipos de captadores de baja temperatura:

##### 1. Captadores sin cubierta:

Son aquellos que no disponen de vidrio protector. Suelen estar formados por uno o varios tubos pintados de negro, de manera que tengan la máxima absorptividad posible. Se caracterizan por tener elevadas pérdidas convectivas debidas al aire del ambiente. Su aplicación más común es el calentamiento de agua para piscinas. La temperatura máxima que pueden alcanzar ronda los  $70^{\circ}C$ .



**Ilustración 17** Captador Solar sin cubierta. Referencia [23]

### 2. Captadores planos:

Son aquellos que disponen de vidrio protector delante de la superficie absorbente. Con ello logran evitar parte de las pérdidas por convección, a cambio de perder parte de la energía incidente por reflexión de los rayos en el cristal y por la transmitancia a través del mismo. La temperatura máxima que suelen alcanzar son los 100°C.



**Ilustración 18** Captador plano. Referencia [24]

### 3. Colectores de vacío:

Son aquellos que además de añadir un vidrio que reduzca las pérdidas por convección, hacen el vacío entre el vidrio y la superficie absorbente. Pueden ser de tubos o planos, dependiendo de la forma del sistema de absorción. Presentan mayores temperaturas que los captadores planos simples, llegando alrededor de 120°C.



**Ilustración 19** Captador de tubos de vacío. Referencia [26]

Dentro de este tipo de colectores, se pueden diferenciar según su modo de trabajo heat pipe, flujo directo, sidney o schott.

Debido a que la aplicación del presente proyecto no exige una temperatura muy elevada, se optará por utilizar captadores planos.

#### 1.4.1.1 Partes de un captador plano

Se nombran las principales partes de los captadores planos y una pequeña descripción de las mismas:

- Cubierta transparente

Es la encargada de cubrir la superficie absorbedora de forma que en el interior se dé el efecto invernadero. De esta forma las pérdidas por convección al ambiente se ven reducidas. Al introducir un cristal antes de la absorción, parte de la radiación se verá reflejada y otra parte absorbida por esta superficie. Interesa reducir esas posibles pérdidas ópticas, durabilidad y resistencia para soportar las condiciones climatológicas a la intemperie y proteger a los elementos situados por debajo, por lo tanto, uno de los materiales más usados para la cubierta será el vidrio con bajo contenido en hierro, que tiene alta transmisividad hasta longitudes de onda de tres micras, abarcando por tanto la gran mayoría del espectro de la radiación incidente, a la vez que la tiene baja para longitudes de onda mayores, que coinciden con el espectro a la temperatura de trabajo del captador. Además es resistente y duradero.

- Superficie absorbente

Es la encargada de recibir la radiación, transformarla en energía térmica y transmitirla al fluido calo portador.

Se suele emplear cobre o acero, bañados en pintura negra o con superficies selectivas que maximicen la absorptividad y minimice la emisividad para las temperaturas típicas de trabajo.

Las disposiciones más usadas son dos:

En la primera, se construye el absorbedor como si fueran dos láminas soldadas, y se hace pasar el fluido calo portador entre ambas. Tiene buena capacidad para calentar el fluido, pero se da una pérdida de carga elevada.

En la segunda, se sueldan tubos a una plancha, de manera que es la plancha la que se calienta y a través de las uniones a los tubos acaba calentado en fluido que circula por el interior de estos. Tiene menos pérdidas de carga, pero peor transmisión de calor desde la superficie al fluido.

Sea cual sea la configuración se intentará conseguir un sistema con pérdidas de carga aceptables, poca corrosión interna, buena transmisión de calor y que maximice la eficiencia del captador.

- Aislamiento térmico

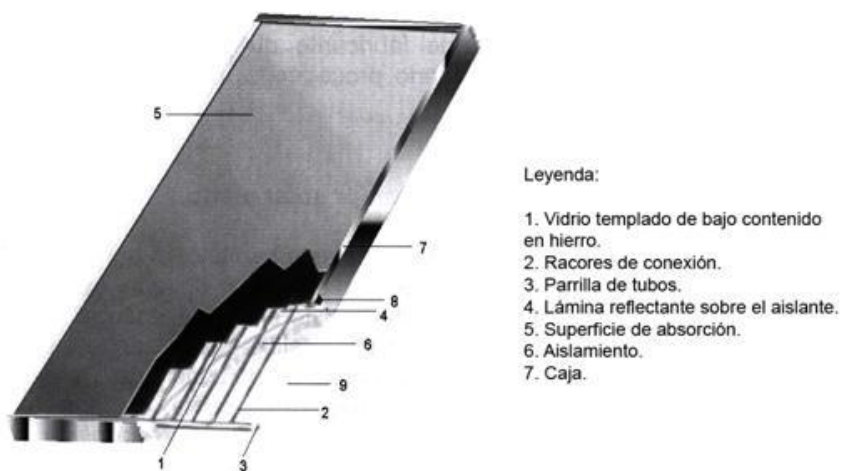
Debido a las temperaturas de trabajo del fluido calo portador, es inevitable que se den pérdidas de calor por convección al ambiente y/o conducción entre elementos.

Para disminuirlas, se suele añadir una capa de aislante, típicamente lana de vidrio.

- Carcasa

Para contener todos los elementos mencionados anteriormente y dotar al sistema de rigidez, se utiliza la carcasa. Además de soportar los elementos, se encarga de protegerlos de las condiciones atmosféricas, humedad o envejecimiento. Las carcasas típicamente están hechas de aluminio, y serán las encargadas de unirse a los soportes que fijaran los colectores al suelo.

En la siguiente ilustración se ve un esquema simple de los elementos mencionados:



I

Ilustración 20 Partes principales de un colector plano. Referencia [22]

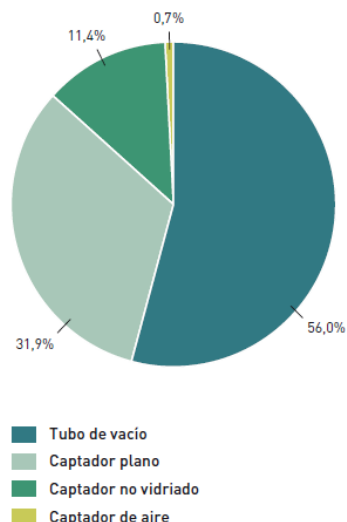
### 1.4.1.2 Estado de los sistemas de captación a nivel mundial

En el siguiente cuadro se encuentran recogidas las diferentes tecnologías antes mencionadas y su estado de maduración e implantación actual:

Tipo de captador	Generación de calor		
	Captador plano sin recubrimiento	Captador plano con recubrimiento	Captador de tubo vacío
Temperatura de salida del fluido (°C)	20-40	60-110	90-110
Rendimiento del captador <sup>2</sup> (%)	~40-50	~70-75	~75-80
Rendimiento de la instalación (%)	~40-50	~65-70	~70-75
Aplicaciones	Piscinas	ACS <sup>1</sup> y calefacción	ACS y calefacción
Clima adecuado	Muy alta irradiación	Muy alta y alta irradiación	Alta y media irradiación
Madurez tecnológica	●	◐	◑
% de cuota de mercado en España	~5	~90	~5

Baja temperatura
  Media temperatura

Ilustración 21 Cuadro de resumen de los tipos de captadores. Figura modificada tomada de Referencia [4]



**Ilustración 22 Capacidad mundial instalada por tipo de colector. Referencia [4]**

El gran porcentaje de tubos de vacío es debido a que china tiene especial predilección a las instalaciones con estos captadores. Mientras que los captadores no vidriados son especialmente frecuentes en Estados Unidos. Para Europa y más concretamente España, el tipo de captador más usado es el plano vidriado.

### 1.4.2 Sistema de almacenamiento

Debido a que la fuente de la que se obtiene la energía, es muy variable a lo largo del día y del año, es necesario un sistema que garantice la cobertura de la demanda.

La obtención del agua caliente para consumo mediante colectores solares, a diferencia de las fuentes tradicionales, no produce la energía necesaria de manera instantánea, así que ésta es frecuentemente almacenada en forma de calor Sensible.

Usualmente se diseña o se compra un tanque capaz de mantener suficiente cantidad de agua a la temperatura de trabajo para cubrir la demanda deseada, normalmente diaria, garantizando con ello cierto grado de independencia.

Cuanto mayor sea el depósito de almacenamiento, en principio, mayor será el margen de maniobra ante una falta continuada de radiación solar. Si bien es cierto, un almacenamiento excesivamente grande puede dar lugar a un aumento drástico de los costes y/o grandes pérdidas de calor al ambiente con caída del rendimiento. Por lo tanto, siempre se intentará buscar un compromiso que sea beneficioso tanto en términos económicos como en productividad para la instalación.

Los dispositivos de almacenamiento normalmente son de acero inoxidable o vitrificados, ya que aguantan bien las temperaturas de trabajo típicas, siendo más económicos estos últimos. Además existen tanques con el intercambiador de calor tipo serpentín, para la transmisión de calor entre fluidos de circuito primario y secundario, ya incorporado. Cuanto mayor sea el volumen a almacenar, más interesante será trasladar el sistema de intercambio fuera del acumulador, reduciendo con ello el tamaño de los mismos.

El factor clave en el acumulador es el grado de estratificación. Cuanto mayor sea este, se trabajará con mejor rendimiento en los captadores, a costa de perder capacidad de almacenamiento. La relación alta entre la altura y el diámetro favorece el aumento de la estratificación en el tanque, igual que trabajar con depósitos unidos en serie.

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

La capacidad de aislamiento del agua en el interior es crítica, siendo a veces indispensable añadir una funda térmica al acumulador, que disminuya las posibles pérdidas al ambiente.



Ilustración 23 Depósito con serpentín. Referencia [29]

### 1.4.3 Sistema hidráulico

Está compuesto por todas las tuberías, bombas, válvulas, vasos de expansión etc. Que permiten la correcta distribución y circulación de los fluidos por el circuito primario y secundario.

Para lograr un diseño adecuado se deben considerar los criterios básicos: caudal, longitud, equilibrado, seguridad y montaje.

Un caudal acorde con las necesidades de la instalación, con una longitud mínima que reduzca costes y pérdidas por fricción, en un sistema sin desequilibrios y seguro, que facilite su montaje y mantenimiento.

#### 1.4.3.1 Tuberías

Los materiales utilizados para el circuito de agua de consumo son el acero inoxidable, el cobre o plásticos.

El acero inoxidable no se suele usar debido a su coste, aunque tienen excelente comportamiento frente a temperaturas elevadas, corrosión y gran resistencia mecánica. En cuanto al cobre, es el más aconsejable para las instalaciones ACS, ya que tiene propiedades deseables, resistencia mecánica y a la corrosión, baja rugosidad, ductilidad y maleabilidad, todo ello con un precio económicamente competitivo. Las tuberías de plástico serán empleadas cuando se pueda garantizar su uso a temperaturas inferiores a 120°C. Tienen cualidades semejantes a las del cobre y menor precio.

Debido a las condiciones de prueba de los circuitos exigidas en el RITE IT 2.2.7, el material a usar en las tuberías será cobre.

Además de las pérdidas de presión que se darán dentro de las mismas, hay que tener en consideración las pérdidas de calor al ambiente. Para disminuir éstas, todas las tuberías de la instalación contarán con aislamiento exterior.



**Ilustración 24 Tubería de cobre con aislamiento. Referencia [30]**

#### **1.4.3.2 Bombas**

Se encargará de impulsar el fluido a través de las tuberías en todos los circuitos. Son necesarias para vencer las resistencias de las tuberías, pérdidas de carga etc. Su diseño será el adecuado al caudal volumétrico y a la altura de impulsión.

Por razones de higiene han de usarse materiales resistentes a la corrosión. Además, al ser la instalación con un área de captadores superior a 50 m<sup>2</sup> se dispondrán de dos bombas en paralelo, que actuarán de manera alternativa.



**Ilustración 25 Bomba centrífuga. Referencia [31]**

#### **1.4.3.3 Vasos de expansión**

Tienen como función principal absorber las dilataciones y contracciones que experimentan los fluidos, tanto en el circuito primario como en el secundario. Estas acciones son debidas a los cambios de temperaturas que existen a lo largo de los circuitos hidráulicos.

Existen dos tipos básicos de vasos de expansión:

- Vasos de expansión abiertos:

Son aquellos que tienen comunicación directa con la atmósfera. Sus principales inconvenientes son el aumento de corrosión de los elementos del circuito, debido a la entrada de aire en el mismo. Además al ser abierto, ha de colocarse en la cota más alta del circuito, incluso por encima de los captadores. Este tipo de vasos está prohibido por el RITE, en la IT 1.3.4.2.4, quedando descartado para la presente instalación



- Vasos de expansión cerrados:

Son aquellos que no tienen contacto con el aire exterior. Se componen de un depósito cerrado, el cual está dividido por una membrana que deja a un lado gas presurizado y a otro lado el fluido del circuito. Cuando la dilatación en el circuito es grande, el líquido entra en el vaso, comprimiendo a través de la membrana el gas situado al otro lado. Una vez que el líquido retoma su volumen inicial, el propio gas impulsa el fluido al circuito al recuperar el espacio inicial que ocupaba en un principio.



Ilustración 26 Vaso de expansión cerrado. Referencia [19]

#### 1.4.3.4 Otros elementos

El resto de los elementos indispensables para el buen funcionamiento del circuito.

Válvulas para aislamiento, equilibrado, vaciado, llenado, purga de aire, retención etc. Tienen que ser capaces de soportar las condiciones de trabajo. Su ubicación en el circuito ha de hacerse para garantizar que cada sección del circuito independiente está protegida y no se estropeará durante tareas de mantenimiento.



Ilustración 27 Válvula de esfera para aislamiento, llenado o vaciado. Referencia [25]

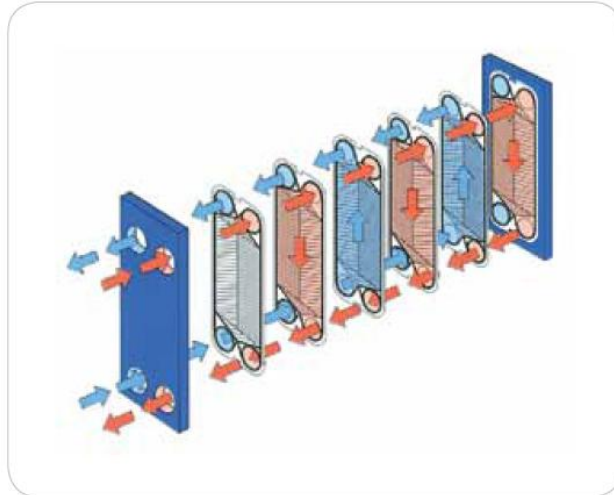
#### 1.4.4 Sistema de intercambio

El sistema de intercambio es el encargado de transmitir la energía captada en los paneles y concentrada en el líquido calo portador, al circuito secundario, que será el agua que finalmente se destine al consumo.



Este sistema puede estar contenido dentro o fuera del almacenamiento. Debido al gran volumen de acumulación necesario para la presente instalación se opta por el de tipo externo, que pasa a describirse a continuación.

El tipo de intercambiador más utilizado es el de placas. Es debido principalmente a que tienen un rendimiento óptimo, son compactos y fáciles de diseñar. Además hay multitud de empresas que se dedican al desarrollo de los mismos.



**Ilustración 28 Principio de trabajo de un intercambiador de placas. Referencia [35]**

El principio de funcionamiento es muy simple. Como se observa en la figura, se hacen pasar ambos fluidos por las cavidades formadas entre dos placas, de manera que se alterna el flujo del fluido caliente con el del frío. Con ello se consigue un intercambio a contracorriente, muy efectivo para la transmisión de calor de uno a otro. Además, las placas no son perfectamente lisas, sino que tienen forma corrugada para aumentar el área de intercambio y mejorar la circulación de los fluidos. Las placas típicamente serán de acero inoxidable.

Los diseños pueden ser compactos, si no permiten variar el número de placas. Éstas a su vez van soldadas unas a otras. Suelen ser robustos.

Por el contrario, existen modelos que permiten el ajuste del número de placas según las necesidades de la instalación, y serán de este tipo los intercambiadores seleccionados.

Para simplificar la presente instalación, se trabajará con un intercambiador de placas con flujos simétricos, es decir, que tenga el mismo caudal de colectores y tanque de almacenamiento.

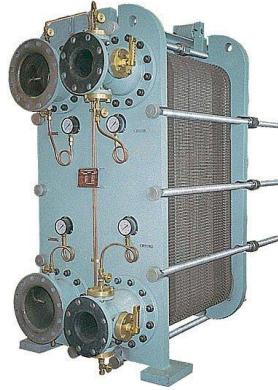


Ilustración 29 Intercambiador de número de placas variables. Referencia [33]

#### 1.4.5 Sistema auxiliar

Debido a que la energía disponible cada día está determinada íntegramente por las condiciones climatológicas, es indispensable disponer de un sistema auxiliar encargado de cubrir la demanda cuando no puede ser cubierta total o parcialmente mediante la instalación termo solar.

La solución tecnológica más frecuente es la caldera de gas o gasoil, que complementa al sistema en todo momento, y sí es capaz de producir la energía requerida de forma instantánea.

El sistema auxiliar puede situarse en serie o en paralelo con la instalación solar, siendo más eficiente el primero de los dos sistemas. Más adelante se describen posibles distribuciones en la instalación.

En la aplicación de este trabajo ya están incluidas las dos calderas de gas que previamente cubrían la demanda de calor para el polideportivo.



Ilustración 30 Caldera de gas. Referencia [33]

#### 1.4.6 Sistema de control

Debido a la cantidad de elementos y la complejidad del sistema, se hace necesario un sistema de control, que basándose en datos medidos en la instalación, permita actuar en consecuencia.

Existen dos tipos básicos de control:

- Control de la temperatura a la entrada y salida de captadores.
- Control del caudal que la bomba envía al intercambiador del circuito primario con el secundario.

El primero es el más extendido y el más simple de los dos.

Se trata de medir la temperatura del fluido calo portador antes y después de pasar por los colectores. Si la diferencia es suficientemente grande, se envía una señal y la bomba hace circular el fluido por los paneles. Cuando la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida alcance un valor muy pequeño, previamente programado, la bomba deja de impulsar fluido hacia los colectores. Así se trabaja siempre con buen rendimiento.

La otra forma de hacer el control es en el intercambiador. Mediante un sensor, se regula el caudal que se hace pasar por el intercambiador primario, de manera que siempre se esté optimizando el máximo de transferencia de calor entre los dos fluidos.

Por simplicidad se seleccionará el primer tipo de control.



**Ilustración 31 Centralita de control y regulación. Referencia [21]**

#### 1.5 Tipos de instalaciones

Según la disposición de los elementos, se pueden distinguir varios tipos de instalaciones:

- Por el principio de circulación:

Pudiendo distinguir en este caso dos tipos básicamente, instalaciones forzadas o de circulación natural.

Las instalaciones de circulación natural son aquellas que funcionan mediante termosifón, es decir, por diferencia de densidades en el colector. El fluido calo portador es el mismo que el de consumo y pasa por los colectores. Cuando se enfría y se calienta cambia su densidad, provocando un movimiento espontáneo del fluido en el sentido del

almacenamiento hacia los colectores. Son instalaciones muy simples y sencillas, normalmente empleadas en viviendas unifamiliares e instalaciones pequeñas.

Las instalaciones de flujo forzado son aquellas que utilizan bombas para la impulsión del fluido calo portador a los colectores solares. Mediante un circuito hidráulico el fluido es impulsado desde el almacenamiento hacia los colectores. Normalmente el fluido calo portador y el fluido de consumo son distintos, por lo que es necesario un sistema de intercambio de calor entre ellos. Se utiliza para medianas y grandes instalaciones.

- Por el sistema de transferencia de calor:

Pudiendo distinguir en este caso tres tipos, instalaciones sin sistema de intercambio, con sistema de intercambio incorporado en el almacenamiento o con sistema de intercambio externo.

Las instalaciones sin sistema de intercambio son aquellas en las que el fluido que circula por los colectores y el fluido de consumo es el mismo, y por lo tanto no es necesario intercambiar calor entre ambos. Es típico de instalaciones pequeñas movidas por termosifón.

Las instalaciones en las que debido a su tamaño, por razones higiénicas o por diseño es necesario establecer dos circuitos separados, uno primario que pasará por los colectores, y otro secundario que será el que finalmente se consuma, es indispensable un intercambiador de calor entre ambos para transmitir el calor de un fluido al otro.

El intercambiador podrá situarse dentro del sistema de almacenamiento, usualmente mediante un serpentín en el depósito por el que el fluido del circuito primario caliente al del circuito secundario. Se estará pues en el segundo caso, teniendo lugar la transmisión de calor en el sistema de almacenamiento.

La otra alternativa es intercambiar el calor fuera del sistema de almacenamiento, normalmente mediante un intercambiador de placas. Esto permite reducir el volumen de los acumuladores, por lo que será usado más frecuentemente en instalaciones de gran tamaño. Ambas soluciones son perfectamente válidas.

- Por el sistema de expansión:

Como se había mencionado antes, existen dos tipos de vasos de expansión y según el modelo que esté se distingue un circuito con expansión abierta o cerrada.

Los circuitos con expansión abierta presentan las ventajas e inconvenientes de este tipo de vasos, de la misma forma que los circuitos de expansión cerrada presentan las características de estos últimos, todas ellas antes mencionadas.

- Por el sistema de aporte de energía auxiliar

Se presentan para esta clasificación multitud de combinaciones, todas ellas según esté situado el sistema auxiliar en el circuito.

Básicamente, el aporte auxiliar puede estar situado en el acumulador principal, en serie con la distribución o en paralelo.

El caso del sistema auxiliar en el acumulador usualmente se asocia con resistencias eléctricas en el tanque de almacenamiento que calientan el fluido de dentro. Este



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

### Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

sistema está en desuso ya que el código técnico impide su implantación. La razón principal es que al aportar la energía en el acumulador, disminuimos el rendimiento de los captadores ya que el fluido del circuito primario es enviado más caliente.

El sistema auxiliar en paralelo es el que entra en uso una vez se ha detectado que con la energía solar no es suficiente para abastecer la demanda. De esta forma, si la temperatura que se requiere es insuficiente, automáticamente se cambia al sistema auxiliar que pasa a cubrir toda la demanda. Este tipo de instalaciones es frecuentemente usado en aplicaciones de calefacción, siendo imposible instalar el sistema en serie, ya que como el circuito de agua tiene que retornar se estaría calentando el almacenamiento y con ello disminuyendo el rendimiento de trabajo de los colectores solares.

El sistema auxiliar en serie es el que se sitúa después del sistema de almacenamiento solar. Si se detecta que la temperatura proveniente de la instalación solar es insuficiente, pasa a cubrirse el déficit mediante la energía auxiliar. De esta forma el sistema auxiliar complementa al solar, por poca que sea la aportación de mismo, siendo mucho más eficiente. Este tipo de instalación será frecuente en aplicaciones de ACS, si bien es cierto que no se puede implantar en sistemas de calefacción, debido al retorno del agua.

Todas las clasificaciones anteriores combinadas entre sí darán lugar a la infinidad de posibles tipos de instalaciones que se pueden llevar a cabo.

Además se puede hacer una última clasificación de las instalaciones solares según su aplicación. En este caso se hablará de instalaciones de agua caliente sanitaria, calefacción, refrigeración, procesos industriales o calentamiento de agua para piscina. Además de sus posibles combinaciones.

## 2 Descripción de la instalación y demanda

El presente polideportivo necesita cubrir una demanda de agua caliente sanitaria y climatización de piscina. El RITE en su IT.1.2. Exigencias de eficiencia energética, impone que los circuitos de climatización de piscina serán independientes de cualquier otro circuito térmico. Por tanto, basándose en este precepto, se decide hacer una separación íntegra de ambas instalaciones. Si bien es cierto que en instalaciones de uso deportivo se puede hacer una excepción, no será el caso del presente proyecto.

### 2.1 Descripción de la instalación ACS

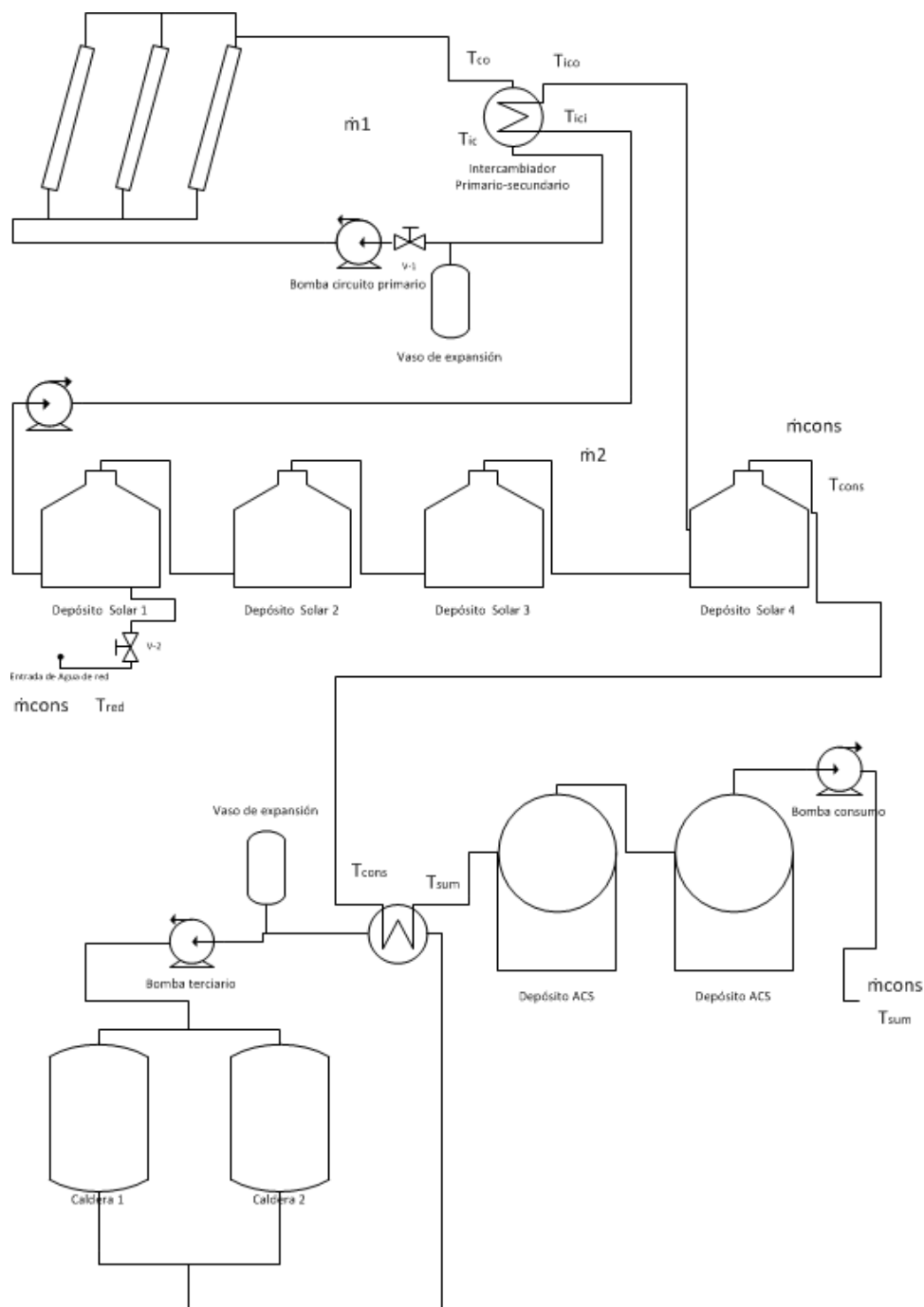


Ilustración 32 Esquema de la instalación ACS

El esquema que se muestra anteriormente quiere ser una representación gráfica simplificada de la instalación ACS, sin ser por tanto un esquema que haga una descripción íntegra de los detalles de la misma.

La instalación de ACS se compone de los subsistemas antes descritos en el trabajo. Se intenta hacer una hibridación con los elementos que tenía el polideportivo anteriormente, por lo que el sistema auxiliar no ha sido ni comprado ni dimensionado, ya que es el mismo que cubría la demanda íntegramente antes de la conjuntarlo con la instalación solar. Del mismo modo, los depósitos ACS no tienen que ver con el sistema de almacenamiento de la parte solar, simplemente el agua es acumulada de nuevo después de conseguir la temperatura deseada para el suministro. Con ello se logra que el sistema auxiliar tampoco tenga que aportar la energía necesaria de forma instantánea.

## 2.2 Demanda de la instalación ACS

Se desglosan las medias mensuales de los últimos cuatro años (desde el 2008 hasta el 2011, ambos incluidos), relativas al consumo de ACS. A partir de estas medidas, se obtienen las medias de consumo mensuales. De esta manera se elimina parte de la variabilidad de los datos debida a condiciones meteorológicas. Los datos han sido cedidos por la empresa responsable del mantenimiento del polideportivo.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2008	404	416	399	495	419	361	238	114	337	487	473	343
2009	387	488	512	412	442	382	274	196	366	483	488	353
2010	399	518	538	490	470	382	269	140	400	486	524	401
2011	418	489	578	432	490	415	258	140	418	472	500	382

Tabla 1 Metros cúbicos de agua caliente sanitaria

Media Mensual	402	478	507	457	455	385	260	148	380	482	496	370
---------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla 2 Medias mensuales de metros cúbicos de agua caliente sanitaria

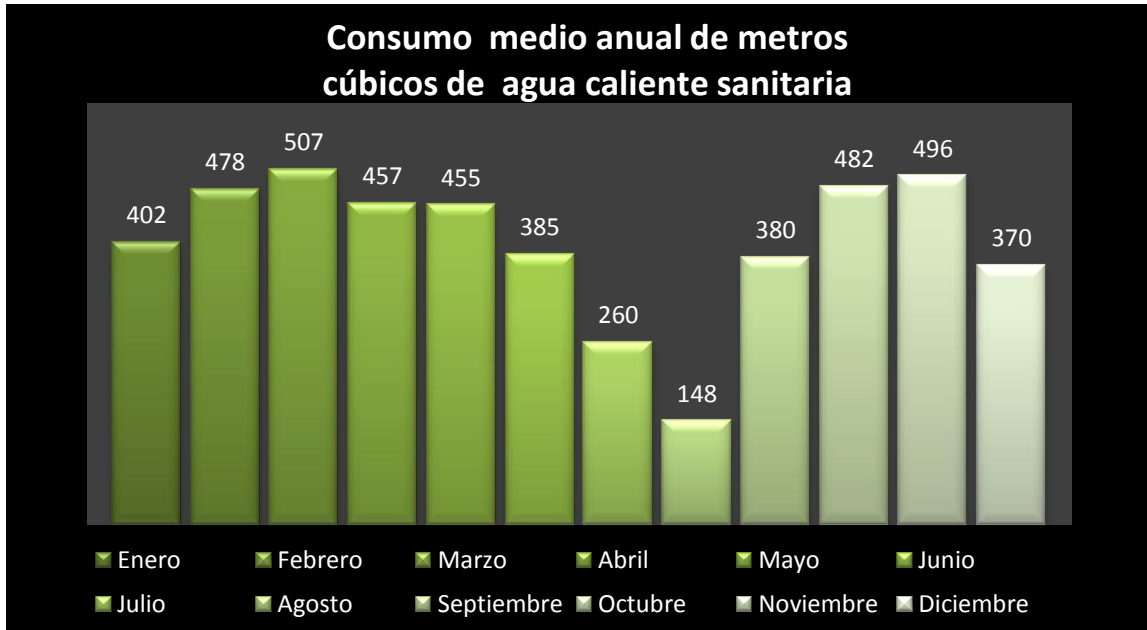


Ilustración 33 Gráfica de la demanda media mensual de agua caliente sanitaria

A partir de los datos, se deduce que la demanda es mucho más alta fuera de la temporada de verano, coincidiendo con la duración del curso escolar. Además hay que añadir que en el estudio no se tiene en cuenta Agosto, debido a que su demanda está por debajo del 50% de la media y gran parte del mes el polideportivo permanece cerrado. Para el dimensionamiento de los colectores necesarios por lo tanto, Agosto no computa.

## 2.3 Ecuaciones para resolver el circuito de ACS

Se describen las ecuaciones necesarias para resolver la instalación. Siempre teniendo en cuenta que no haya pérdidas de calor en tuberías ni almacenamiento.

### 2.3.1.1 Balance de energía en los captadores

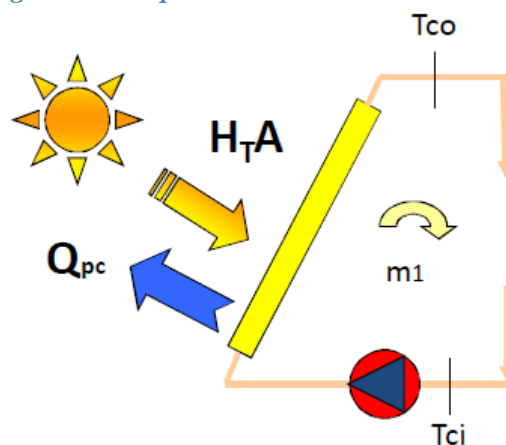


Ilustración 34 Balance de energía en el sistema de captación. Referencia [17]



La temperatura de circulación del fluido calo portador en el captador se define como:

$$T_m = \frac{T_{co} + T_{ci}}{2}$$

La expresión del rendimiento según la curva de normalización:

$$\eta_{CN} = a_0 - a_1 \cdot \left( \frac{T_0 - T_m}{H_T} \right)$$

Por otra parte, el rendimiento puede definirse de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{H_T \cdot A_{\text{absorberdor}}}$$

Sabiendo que:

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = \dot{m}_1 \cdot c_1 \cdot (T_{co} - T_{ci})$$

Se iguala la expresión, quedando:

$$\dot{m}_1 \cdot c_1 \cdot (T_{co} - T_{ci}) = H_T \cdot A_{\text{absorberdor}} \cdot \left[ a_0 - a_1 \cdot \left( \frac{T_0 - T_m}{H_T} \right) \right]$$

### 2.3.1.2 Balance en el intercambiador del circuito primario y secundario

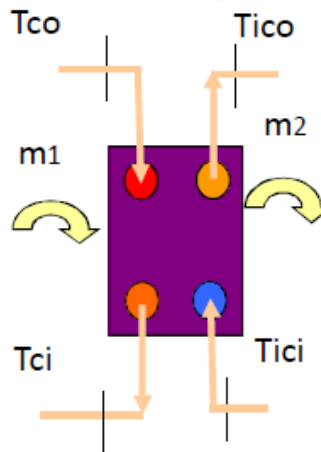


Ilustración 35 Balance de energía en el intercambiador. Referencia [17]

Como premisas de diseño, el intercambiador será de flujos simétricos y con efectividad de valor conocido e igual a 0.5.

Por tanto:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\varepsilon = 0.5$$

Haciendo un balance de los dos flujos queda la expresión:

$$\dot{m}_1 \cdot c_1 \cdot (T_{c0} - T_{ci}) = \dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot (T_{ic0} - T_{ici})$$

Por otro lado, la expresión genérica para un fluido caliente, h, y otro frío, c, de la eficiencia es la siguiente:

$$\varepsilon = \frac{C_h \cdot (T_{ho} - T_{hi})}{C_{minimo} \cdot (T_{ho} - T_{ci})} = \frac{C_c \cdot (T_{co} - T_{ci})}{C_{minimo} \cdot (T_{ho} - T_{ci})}$$

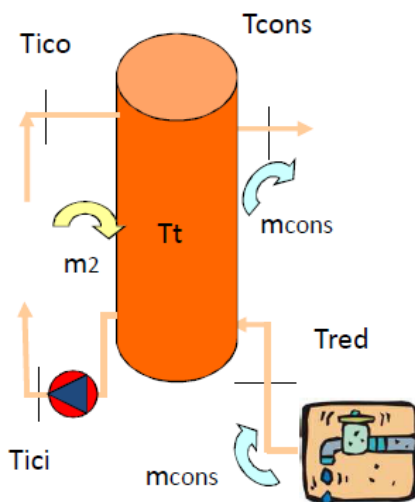
Siendo:

$$\begin{aligned} C_h &= \dot{m}_h \cdot c_h \\ C_c &= \dot{m}_c \cdot c_c \\ C_{\min} &= \min(C_h, C_c) \end{aligned}$$

Aplicado en el caso del intercambiador presente:

$$\varepsilon = 0.5 = \frac{C_1 \cdot (T_{co} - T_{ci})}{C_{minimo} \cdot (T_{co} - T_{ici})} = \frac{C_2 \cdot (T_{ico} - T_{ici})}{C_{minimo} \cdot (T_{co} - T_{ici})}$$

### 2.3.1.3 Balance de energía en el sistema de almacenamiento



**Ilustración 36 Balance de energía en el acumulador. Referencia [17]**

Se obtiene la siguiente expresión:

$$\dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot (T_{co} - T_{ci}) = \dot{m}_{cons} \cdot c_{cons} \cdot (T_{cons} - T_{red})$$

Donde el gasto de entrada de agua es igual al gasto de agua que se destina a consumo.

Por otro lado, la temperatura media del agua acumulada puede obtenerse de la siguiente expresión:

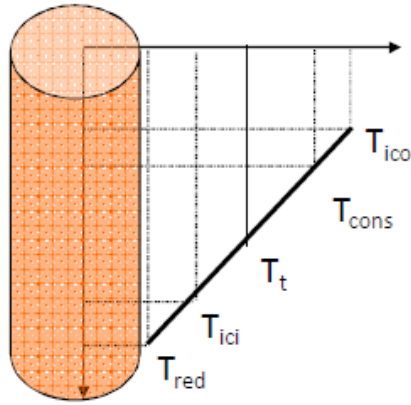


Ilustración 37 Esquema de distribución de temperaturas en la acumulación. Referencia [17]

Considerando el agua de acumulación a la misma temperatura:

$$\dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot T_{ico} + \dot{m}_{cons} \cdot c_{cons} \cdot T_{red} = (\dot{m}_2 \cdot c_2 + \dot{m}_{cons} \cdot c_{cons}) \cdot T_t$$

Siendo  $T_t$  la temperatura media del agua y el fluido ser el mismo, se despeja:

$$T_t = \frac{\dot{m}_2 \cdot T_{ico} + \dot{m}_{cons} \cdot T_{red}}{\dot{m}_2 + \dot{m}_{cons}}$$

El grado de estratificación se define como:

$$\begin{aligned} E_t = 0 & \Rightarrow_{si} T_t = T_{cons} \\ E_t = 1 & \Rightarrow_{si} T_{cons} = T_{ico} \end{aligned}$$

Entonces:

$$E_t = \frac{T_{cons} - T_t}{T_{ico} - T_t}$$

El valor asignado por defecto al grado de estratificación será  $E_t = 0.25$

#### 2.3.1.4 Fracción solar

Se define como la fracción de la demanda cubierta con energía solar

$$f = \frac{\dot{m}_{cons} \cdot c_{cons} \cdot (T_{cons} - T_{red})}{\dot{m}_{cons} \cdot c_{cons} \cdot (T_{sum} - T_{red})}$$

Simplificando:

$$f = \frac{T_{cons} - T_{red}}{T_{sum} - T_{red}}$$

## 2.4 Descripción de la instalación de la piscina

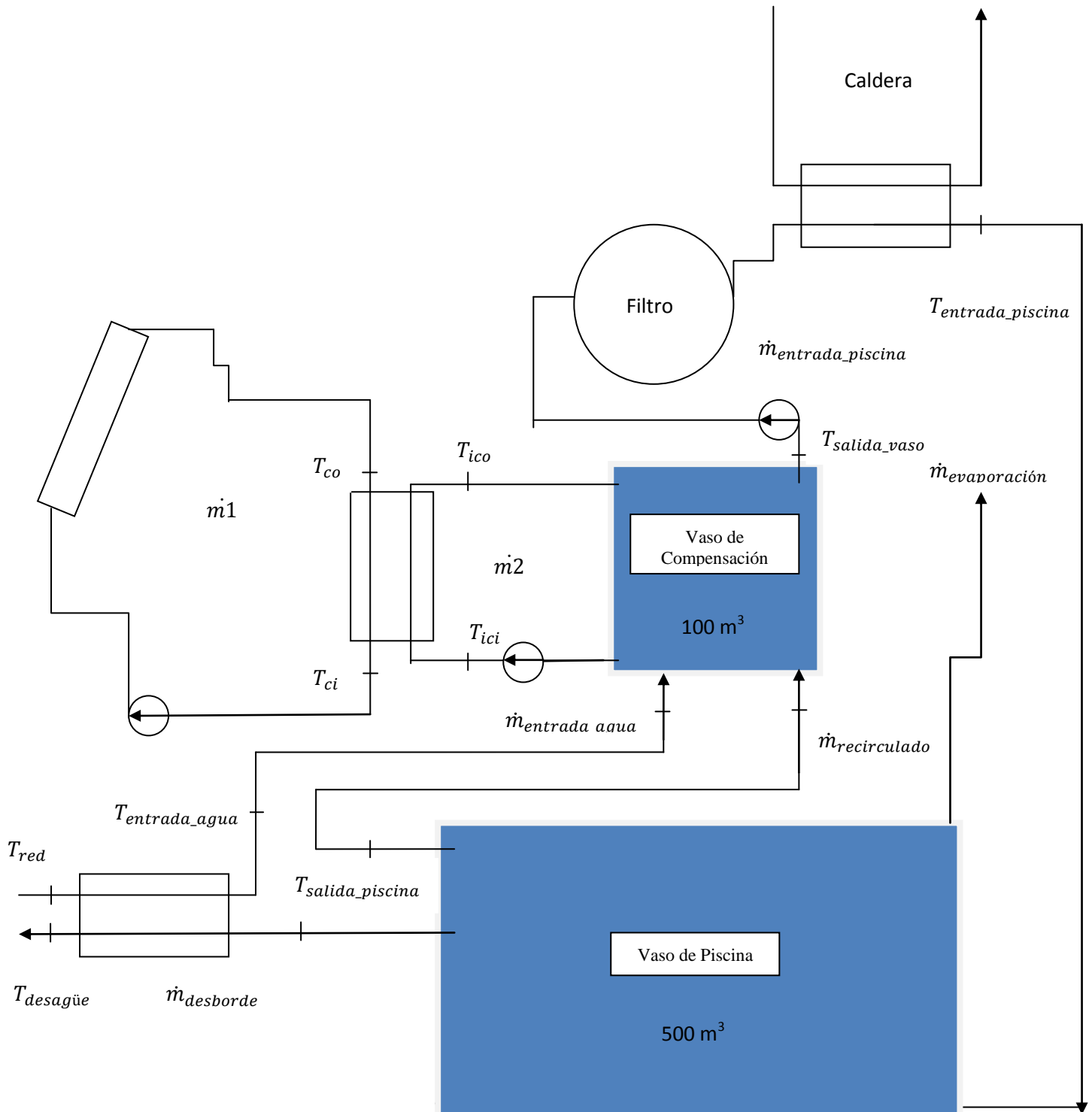


Ilustración 38 Esquema de la piscina.

El esquema que se muestra anteriormente también es una representación gráfica simplificada de la instalación de la piscina, sin ser por tanto un esquema que haga una descripción íntegra de los detalles de la misma.

La piscina en realidad se sitúa por encima del vaso de compensación y el circuito hidráulico. El sistema de acumulación está integrado en el vaso de compensación, de manera que no hace falta depósito aparte. Al igual que antes, el sistema auxiliar y de distribución para la piscina es el mismo que se usaba antes de la instalación solar, luego no se dimensionarán ni calcularán aparte.

### 2.5 Demanda de la instalación de la piscina

Al igual que con la instalación de ACS, se hacen las medias relativas al agua de renovación de la piscina de los últimos cuatro años. Además, como el circuito de la piscina exige recirculación continua, también se añaden los datos de recirculación medios para cada mes, junto con las condiciones climáticas de la piscina.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2008	308	177	231	301	281	285	171	594	265	298	299	184
2009	185	225	235	200	208	193	130	623	165	200	189	161
2010	185	133	160	132	184	197	115	631	156	204	175	190
2011	154	161	187	193	180	181	132	621	175	128	169	206

Tabla 3 Metros cúbicos de agua caliente para piscina

Media Mensual	208	174	203	207	213	214	137	617	190	208	208	185
---------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla 4 Medias mensuales de metros cúbicos de agua caliente para piscina

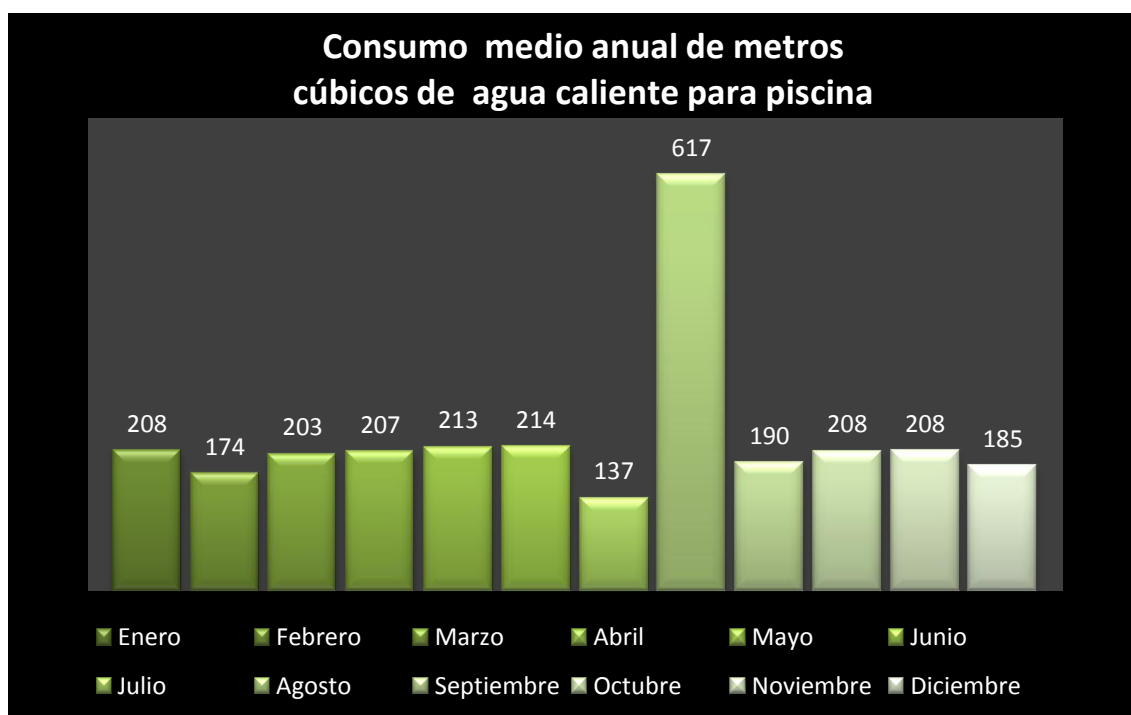


Ilustración 39 Gráfica de la demanda media de agua caliente para piscina

Nótese que es frecuente la renovación íntegra del agua de la piscina y vaso de compensación durante el periodo vacacional de agosto.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
H.R.	0,565	0,603	0,528	0,580	0,592	0,585	0,498	0,525	0,614	0,623	0,581	0,595
T <sup>a</sup>	29,2	28,8	28,9	28,8	29,4	29,8	30,2	31,5	29,7	29,4	28,8	29,0

**Tabla 5 Condiciones climatológicas de la piscina**

Los datos de las condiciones ambientales de la piscina climatizada están basados en las medidas tomadas durante un año. H.R. corresponde a la media mensual de la humedad relativa en el recinto, al igual que T<sup>a</sup> es la media mensual de temperatura ambiente de la piscina en grados Celsius (°C).

Como se puede ver, los datos cumplen las exigencias del RITE, manteniéndose la temperatura exterior del aire de la piscina entre 1 y 2 °C por encima de la temperatura del agua, que es constante a lo largo de todo el año y de valor 28.5 °C.

En cuanto a la humedad relativa del recinto, siempre permanece por debajo del valor máximo aceptable, 65%.

En cuanto al caudal de recirculación, se incluyen en la tabla las medias diarias por mes en metros cúbicos para el mismo año.

Media Mensual Recirculación	181	192	199	182	197	202	189	199	190	193	193	191
-----------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

**Tabla 6 Media de metros cúbicos diarios de agua de recirculación para cada mes**

Como se observa, la recirculación es casi constante a lo largo de los meses, debido a que las condiciones de la piscina varían muy poco durante el año.

A diferencia de otras comunidades autónomas, Madrid en su Reglamento del régimen Técnico-Sanitario de Piscinas no establece ningún porcentaje del agua de renovación que ha de ser repuesto diariamente, sólo se condiciona éste último a cumplir unos requisitos higiénicos en el agua de la piscina.

Se supondrá entonces que el polideportivo cumple esas condiciones higiénico-sanitarias con las renovaciones y recirculaciones medias que se imponen, aunque siempre será indispensable un control diario que garantice que los parámetros necesarios para determinar la calidad del agua se encuentran dentro de los límites legales. Como el objetivo del presente proyecto es dimensionar un sistema que aporte calor al vaso de la piscina, no se mencionará en ningún momento el sistema de control y gestión de la calidad del agua.

## 2.6 Ecuaciones para resolver el circuito de la piscina

Se describen las ecuaciones necesarias para resolver la instalación

### 2.6.1.1 Balance de energía en los captadores

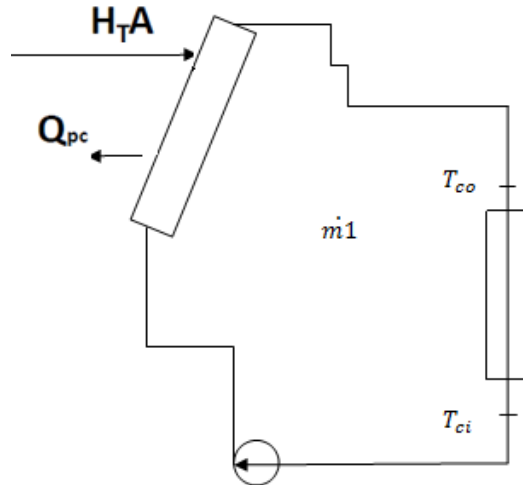


Ilustración 40 Balance de energía en el sistema de captación

Siendo la irradiación  $H_T$ , para un área  $A$  de captación y  $Q_{pc}$  las pérdidas del captador.

La temperatura de circulación del fluido caloportador en el captador se define como:

$$T_m = \frac{T_{co} + T_{ci}}{2}$$

La expresión del rendimiento según la curva de normalización:

$$\eta_{CN} = a_0 - a_1 \cdot \left( \frac{T_0 - T_m}{H_T} \right)$$

Por otra parte, el rendimiento puede definirse de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{H_T \cdot A_{\text{absorbedor}}}$$

Sabiendo que:

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = \dot{m}_1 \cdot c_1 \cdot (T_{co} - T_{ci})$$

Se iguala la expresión, quedando:

$$\dot{m}_1 \cdot c_1 \cdot (T_{co} - T_{ci}) = H_T \cdot A_{\text{absorbedor}} \cdot \left[ a_0 - a_1 \cdot \left( \frac{T_0 - T_m}{H_T} \right) \right]$$



2.6.1.2 Balance en el intercambiador del circuito primario y secundario

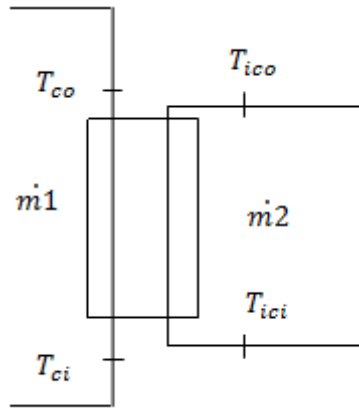


Ilustración 41 Balance de energía en el intercambiador

Como premisas de diseño, el intercambiador será de flujos simétricos y con efectividad de valor conocido e igual a 0.5.

Por tanto:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\varepsilon = 0.5$$

Haciendo un balance de los dos flujos queda la expresión:

$$\dot{m}_1 \cdot c_1 \cdot (T_{co} - T_{ci}) = \dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot (T_{ico} - T_{ici})$$

Por otro lado, la expresión genérica para un fluido caliente, h, y otro frío, c, de la eficiencia es la siguiente:

$$\varepsilon = \frac{C_h \cdot (T_{ho} - T_{hi})}{C_{\minimo} \cdot (T_{ho} - T_{ci})} = \frac{C_c \cdot (T_{co} - T_{ci})}{C_{\minimo} \cdot (T_{ho} - T_{ci})}$$

Siendo:

$$C_h = \dot{m}_h \cdot c_h$$

$$C_c = \dot{m}_c \cdot c_c$$

$$C_{\minimo} = \min (C_h, C_c)$$

Aplicado en el caso del intercambiador presente:

$$\varepsilon = 0.5 = \frac{C_1 \cdot (T_{co} - T_{ci})}{C_{\minimo} \cdot (T_{co} - T_{ici})} = \frac{C_2 \cdot (T_{ico} - T_{ici})}{C_{\minimo} \cdot (T_{co} - T_{ici})}$$

Aplicado en el caso del intercambiador recuperador de calor del agua rebosada:

$$\dot{m}_{entrada\_agua} \cdot c_2 \cdot (T_{entrada\_agua} - T_{red}) = \dot{m}_{desborde} \cdot c_2 \cdot (T_{salida\_piscina} - T_{desagüe})$$

$$\varepsilon = 0.5 = \frac{\dot{m}_{entrada\_agua} \cdot c_2 \cdot (T_{entrada\_agua} - T_{red})}{C_{minimo} \cdot (T_{salida\_piscina} - T_{red})}$$

### 2.6.1.3 Balance de energía en la piscina

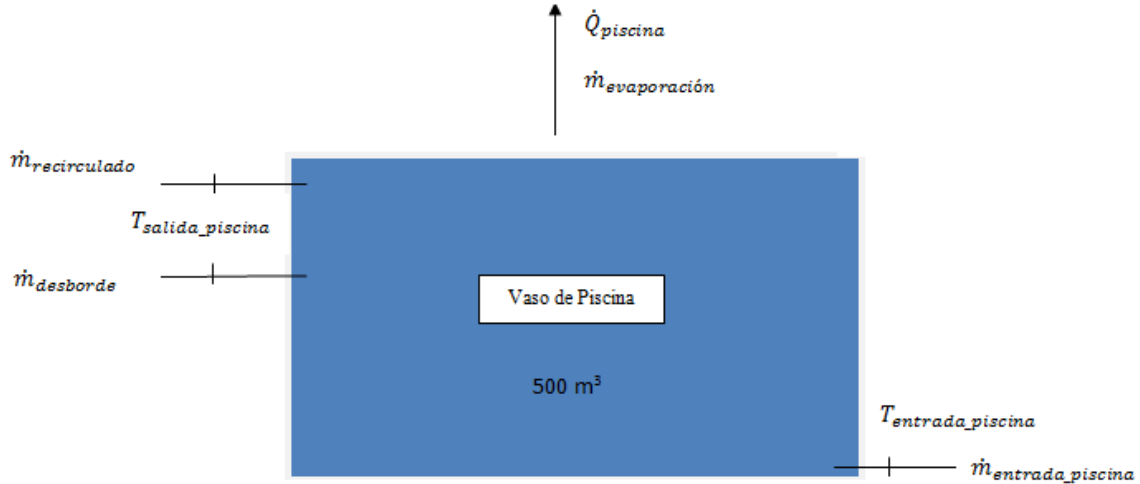


Ilustración 42 Balance de energía en la piscina

Las pérdidas de calor de la piscina han de ser cubiertas con el agua caliente de aporte.

Según el pliego de condiciones de instalaciones de baja temperatura del IDAE, las pérdidas producidas en una piscina cubierta pueden determinarse mediante la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{piscina} (kW) = [130 - 3 \cdot t_{ws} + 0,2(t_{ws})^2] \cdot \frac{S_w}{1000}$$

Siendo

- $t_{ws}$  la temperatura del agua de la piscina en °C.
- $S_w$  la superficie total de la piscina en  $m^2$ .

De la pérdida calculada, un 85% corresponde a pérdidas de calor por evaporación, y el resto a pérdidas por radiación.

Balance de masa del agua de renovación:

$$\dot{m}_{agua\_entrante} = \dot{m}_{desborde} + \dot{m}_{evaporación}$$

Balance de masa de la piscina:

$$\dot{m}_{entrada\_piscina} = \dot{m}_{desborde} + \dot{m}_{evaporación} + \dot{m}_{recirculado}$$

Balance de energía en la piscina:

$$\dot{Q}_{piscina} = \dot{m}_{entrada\_piscina} \cdot c_2 \cdot (T_{entrada\_piscina} - T_{salida\_piscina})$$

Conocido el valor de las pérdidas, también es conocido el valor del gasto másico de evaporación, sabiendo que supone aproximadamente el 85% del total:

$$\dot{m}_{\text{evaporación}} = \frac{\dot{Q}_{\text{piscina}} \cdot 85\%}{h_{fg}}$$

Siendo  $h_{fg}$  el valor de la entalpía de vaporización, conocido.

#### 2.6.1.4 Balance de energía en el sistema de almacenamiento

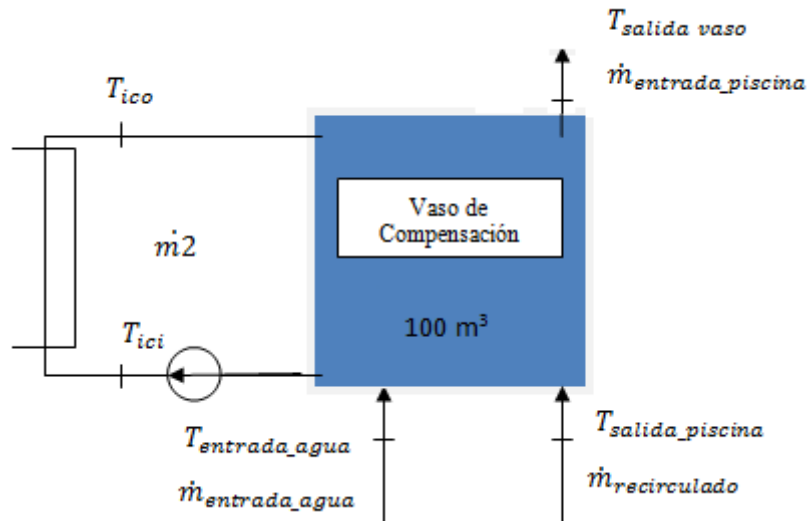


Ilustración 43 Balance de energía en el vaso de compensación

Se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot (T_{co} - T_{ci}) &= \\ &= \dot{m}_{\text{entrada\_agua}} \cdot c_2 \cdot (T_{\text{salida\_vaso}} - T_{\text{entrada\_agua}}) + \dot{m}_{\text{recirculado}} \cdot c_2 \\ &\quad \cdot (T_{\text{salida\_vaso}} - T_{\text{salida\_piscina}}) \end{aligned}$$

Además, por balance de masa

$$\dot{m}_{\text{entrada\_piscina}} = \dot{m}_{\text{entrada\_agua}} + \dot{m}_{\text{recirculado}}$$

La temperatura media del agua acumulada puede obtenerse de la siguiente expresión:

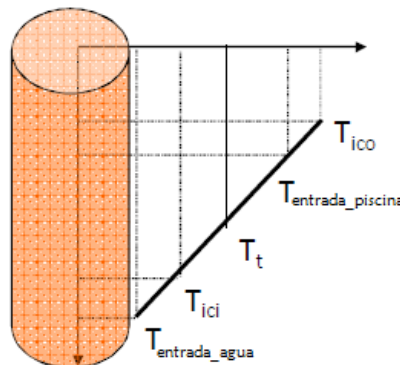


Ilustración 44 Esquema de distribución de temperaturas en la acumulación. Figura modificada de referencia [17]

Considerando el agua de acumulación a la misma temperatura:

$$\begin{aligned} \dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot T_{ico} + \dot{m}_{entrada\_agua} \cdot c_2 \cdot T_{entrada\_agua} + \dot{m}_{recirculado} \cdot c_2 \cdot T_{salida\_piscina} = \\ = \dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot T_t + \dot{m}_{entrada\_piscina} \cdot c_2 \cdot T_t \end{aligned}$$

Siendo  $T_t$  la temperatura media del agua, se despeja:

$$T_t = \frac{\dot{m}_2 \cdot T_{ico} + \dot{m}_{entrada\_agua} \cdot T_{entrada\_agua} + \dot{m}_{recirculado} \cdot T_{salida\_piscina}}{\dot{m}_2 + \dot{m}_{entrada\_agua} + \dot{m}_{recirculado}}$$

El grado de estratificación se define como:

$$\begin{aligned} E_t = 0 &\Rightarrow T_t = T_{salida\_vaso} \\ E_t = 1 &\Rightarrow T_{salida\_vaso} = T_{ico} \end{aligned}$$

Entonces:

$$E_t = \frac{T_{salida\_vaso} - T_t}{T_{ico} - T_t}$$

El valor asignado por defecto al grado de estratificación será  $E_t = 0.25$

### 2.6.1.5 Fracción solar

Se define como la fracción de la demanda cubierta con energía solar

$$\begin{aligned} f &= \frac{\dot{Q}_{solar}}{\dot{Q}_{neto \text{ aportado}}} \\ &= \frac{\dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot (T_{ico} - T_{ici})}{\dot{m}_{entrada\_agua} \cdot c_2 \cdot (T_{entrada\_piscina} - T_{entrada\_agua}) + \dot{m}_{recirculado} \cdot c_2 \cdot (T_{entrada\_piscina} - T_{salida\_piscina})} \\ &= \frac{\dot{m}_2 \cdot (T_{ico} - T_{ici})}{\dot{m}_{entrada\_agua} \cdot (T_{entrada\_piscina} - T_{entrada\_agua}) + \dot{m}_{recirculado} \cdot (T_{entrada\_piscina} - T_{salida\_piscina})} \end{aligned}$$

### 3 Cálculo de componentes de la instalación de ACS

#### 3.1 Cálculo del sistema de captación

Antes de proceder al dimensionamiento del área necesaria para cubrir el porcentaje de demanda correspondiente, se va a calcular las propiedades necesarias en el fluido calo portador que circulará por dentro de los colectores solares. Éste deberá ser capaz de soportar las bajas temperatura del invierno y minimizar los riesgos causados por las posibles heladas, además de no disolverse con las altas temperaturas dentro del sistema de captación en el periodo de verano.

Para dimensionar el porcentaje de anticongelante necesario en el circuito primario hay que basarse en la temperatura mínima histórica registrada.

*Altitud, latitud, longitud y temperatura mínima histórica (la más baja que se haya medido desde el primer año del que se conservan registros de datos).*

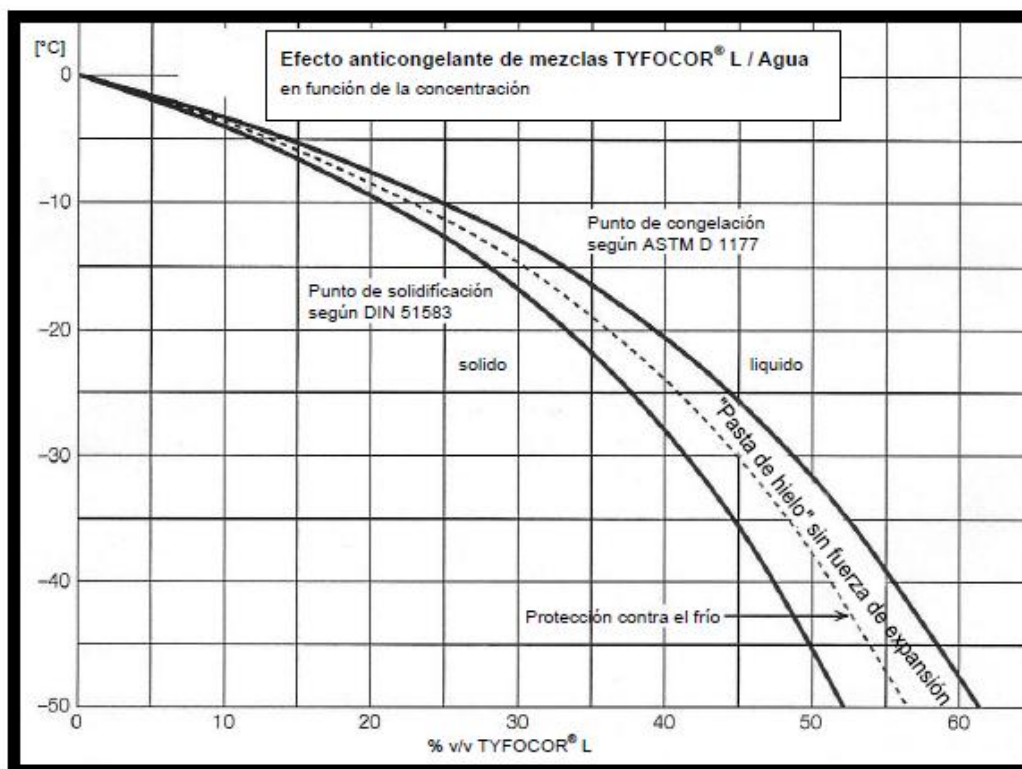
PROVINCIA	ALTITUD (m) (de la capital)	LATITUD (°) (de la capital)	LONGITUD (°) (de la capital)	TEMP. MÍNIMA HISTÓRICA (°C)
1 ÁLAVA	542	42,9	2,7 W	-18
2 ALBACETE	686	39,0	1,8 W	-23
3 ALICANTE	7	38,4	0,5 W	-5
4 ALMERÍA	65	36,9	2,4 W	-1
5 ASTURIAS	232	43,4	5,8 W	-11
6 ÁVILA	1126	40,7	4,9 W	-21
7 BADAJOZ	186	38,9	7,0 W	-6
8 BALEARES	28	39,6	2,6 E	-4
9 BARCELONA	95	41,4	2,2 E	-7
10 BURGOS	929	42,3	3,7 W	-18
11 CÁCERES	459	39,5	6,4 W	-6
12 CÁDIZ	28	36,5	6,3 W	-2
13 CANTABRIA	69	43,5	3,8 W	-4
14 CASTELLÓN	27	40,0	0	-8
15 CEUTA	206	35,9	5,3 W	-1
16 CIUDAD REAL	628	39,0	3,9 W	-10
17 CÓRDOBA	128	37,9	4,8 W	-6
18 LA CORUÑA	54	43,4	8,4 W	-9
19 CUENCA	949	40,1	2,1 W	-21
20 GERONA	95	42,0	2,7 E	-11
21 GRANADA	775	37,2	3,7 W	-13
22 GUADALAJARA	685	40,6	3,2 W	-14
23 GUIPÚZCOA	181	43,3	2,0 W	-12
24 HUELVA	4	37,3	6,9 W	-6
25 HUESCA	488	42,1	0,4 W	-14
26 JAÉN	586	37,8	3,8 W	-8
27 LEÓN	908	42,6	5,6 W	-18
28 LÉRIDA	323	41,7	1,2 E	-11
29 LUGO	465	43,0	7,6 W	-8
30 MADRID	667	40,4	3,7 W	-16
31 MÁLAGA	40	36,7	4,4 W	-4
32 MELILLA	47	35,3	3,0 W	-1
33 MURCIA	42	38,0	1,1 W	-5

Ilustración 45 Tabla con los datos de temperaturas mínimas registradas en España. Referencia [7]

El anticongelante seleccionado será el propilenglicol y su fracción en agua es la correspondiente para que la mezcla no se congele a una temperatura 5°C inferior a la mínima registrada.

$$T_{propilenglicol} = T_{mínima} - 5^{\circ}\text{C} = -16^{\circ}\text{C} - 5^{\circ}\text{C} = -21^{\circ}\text{C}$$

Se recurre al fabricante Tyfocor y con la siguiente gráfica se determina la fracción en volumen de propilenglicol.



**Ilustración 46** Porcentaje de propilenglicol en función de la temperatura de congelación. Referencia [37]

Se observa que para  $-21^{\circ}\text{C}$ , la fracción necesaria es del 34% en volumen. Con ello y con las gráficas suministradas por el fabricante determinamos las propiedades del fluido del circuito primario. Para ello suponemos una temperatura media del circuito de  $40^{\circ}\text{C}$ , obteniendo la siguiente tabla de datos:

Fluido	Densidad $[\rho]$	Capacidad Térmica específica $[C_p]$	Conductividad térmica $[K]$	Viscosidad dinámica $[\mu]$	Viscosidad cinemática $[\nu]$
Tyfocor-L y Agua al 34%	$1015 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	$3850 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$	$0.47 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	$1.218 \left[ \text{mPa} \cdot \text{s} \right]$	$1.2 \left[ \frac{\text{mm}^2}{\text{s}} \right]$

**Tabla 7** Propiedades del fluido calo portador del circuito primario.

Las tablas se adjuntan en el anexo 9.2.4.

### 3.1.1 Cálculo del área de captadores

Haciendo uso de la hoja de cálculo de Mathcad incluida en el Anexo 9.1 del presente trabajo, se procede a la estimación del área necesaria para cubrir la demanda.

Como se explicará adelante, el programa básicamente calcula la fracción solar y el rendimiento medio característicos en el día medio de cada mes a partir de una serie de parámetros introducidos, entre ellos el área.

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

Para obtener el área necesaria, por lo tanto, se procederá a cumplir la normativa exigida por el código técnico de la edificación, cuyas limitaciones más características son:

-Cubrir una fracción solar equivalente al 70% de la demanda anual. Esto es debido a que Leganés se sitúa dentro de la zona IV climática del País y Además, a que se consumen en torno a 15000 litros de ACS al día.

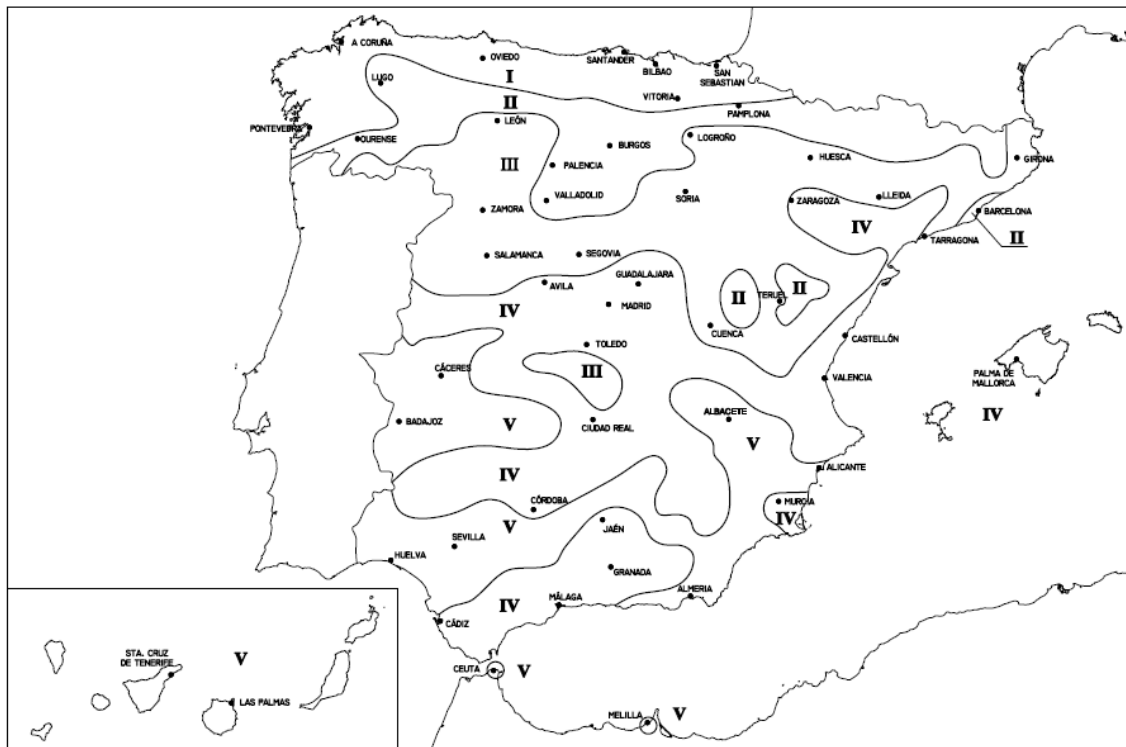


Ilustración 47 Zonas climáticas de España. Referencia [6]

Demanda total de ACS del edificio (l/d)	Zona climática				
	I	II	III	IV	V
50-5.000	30	30	50	60	70
5.000-6.000	30	30	55	65	70
6.000-7.000	30	35	61	70	70
7.000-8.000	30	45	63	70	70
8.000-9.000	30	52	65	70	70
9.000-10.000	30	55	70	70	70
10.000-12.500	30	65	70	70	70
12.500-15.000	30	70	70	70	70
15.000-17.500	35	70	70	70	70
17.500-20.000	45	70	70	70	70
> 20.000	52	70	70	70	70

Ilustración 48 Contribución solar mínima según consumos y zona climática. Referencia [6]

-No sobrepasar más de 100% de producción durante tres meses consecutivos.

-No producir más de 110% de la demanda un mes. Debido a la dificultad que esto conlleva por la caída de la demanda en verano, se procederá a la instalación de disipadores de energía que permitan cumplir la normativa vigente.

- No se toman en consideración aquellos periodos de tiempo en los cuales la demanda energética se sitúe un 50 % por debajo de la media correspondiente al resto del año. Por este



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

motivo los datos obtenidos para el mes de agosto son restados del total, ya que el polideportivo no está abierto al público la totalidad del mes, dando lugar a una demanda por debajo del 50% de la media anual que no es representativa del resto del año. Se podrá aprovechar estos días para labores de mantenimiento.

Los datos requeridos por el programa se muestran a continuación

Para diseñar la instalación son necesarios los datos que se adjuntan en la siguiente tabla, la cual fue obtenida a partir de los apuntes de la asignatura Instalaciones de Energías Renovables y de la web <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=es&map=europe>.

	Irradiación Total diaria media mensual en Leganés $\left[ \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot dia} \right]$	Irradiación Difusa diaria media mensual en Leganés $\left[ \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot dia} \right]$	Tª media mensual diurna [°C]	Tª agua de red [°C]
<b>Enero</b>	2083	885	6,2	8
<b>Febrero</b>	2921	1255	7,4	8
<b>Marzo</b>	4366	1624	9,9	10
<b>Abril</b>	5543	2031	12,2	12
<b>Mayo</b>	6449	2183	16	14
<b>Junio</b>	7371	2036	20,7	17
<b>Julio</b>	7801	1599	24,4	20
<b>Agosto</b>	6757	1602	23,9	19
<b>Septiembre</b>	5185	1573	20,5	17
<b>Octubre</b>	3269	1354	14,7	13
<b>Noviembre</b>	2273	989	9,4	10
<b>Diciembre</b>	1802	798	6,4	8

Tabla 8 Datos climatológicos de Leganés introducidos en el programa Mathcad para dimensionar ACS

Todos los datos introducidos hacen referencia a la media para un día tipo de cada mes. A partir del comportamiento en un día, se estima la actuación durante el mes y con ello durante todo el año.

Cada columna de la tabla será asignada a una variable dentro del programa.

Para completar la información necesaria para dimensionar los captadores hace falta introducir la latitud, que se encuentra en la tabla de coordenadas geográficas:

<b>Latitud</b>	40°19'35'' Norte
<b>Longitud</b>	3°45'32'' Oeste
<b>altitud</b>	661 metros

Tabla 9 Coordenadas geográficas

El modelo de captador utilizado será Vitosol 200-F del fabricante Viessman. Sus características técnicas vienen detalladas en el anexo 9.2.1. Aquí se incluye una tabla con sus coeficientes de la curva de rendimiento normalizada.

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

Fabricante	Modelo	$a_0$	$a_1$ [w/m <sup>2</sup> ·K]	$a_2$ [w/m <sup>2</sup> ·K <sup>2</sup> ]	Área Absorbedor [m <sup>2</sup> ]
Viessman	Vitosol-200F	0,793	3.95	0,0096	2,321

**Tabla 10 Características técnicas del captador**

Una vez que se introducen los datos pertinentes en el programa, se realiza un pequeño análisis para elegir el ángulo adecuado de inclinación de los captadores, y encontrar un área que satisfaga los requisitos del código técnico. Se sabe que para aplicaciones con consumo constante a lo largo del año, como puede ser una instalación ACS, el ángulo óptimo de inclinación recomendado es igual al valor de la latitud. En este caso, los datos de la demanda parecen ser constantes a lo largo del año, si bien es cierto que durante los meses de verano es muy inferior, llegando a no ser tenido en cuenta Agosto. Es por tanto que se quiere esclarecer qué inclinación es mejor, si la anual o la de invierno.

Para el análisis se prueban distintas áreas para un caudal nominal fijo por los captadores hasta lograr dar con el número de colectores que permiten cubrir la demanda solicitada por el código técnico. Después se varía el ángulo entre la inclinación óptima anual en adelante y se observa cuál es la inclinación más adecuada, dando lugar a la siguiente tabla:

$\beta$ [°]	$\gamma$ [°]	A [m <sup>2</sup> ]	$f_{\text{anual}}$	m [l/h]	$\eta_{\text{medio}}$	Energía Producida X 10 <sup>11</sup> [J]	Energía Neta X 10 <sup>11</sup> [J]	Energía perdida X 10 <sup>11</sup> [J]
55	0	292,446	0,701	85	0,42	0,2166	0,2101	0,0065
53	0	292,446	0,704	85	0,419	0,2181	0,2111	0,007
51	0	292,446	0,708	85	0,4185	0,2194	0,2118	0,0076
49	0	292,446	0,71	85	0,418	0,2205	0,2124	0,0081
47	0	292,446	0,712	85	0,417	0,2214	0,2128	0,0086
45	0	292,446	0,713	85	0,416	0,2221	0,2131	0,009
40,33	0	292,446	0,714	85	0,415	0,223	0,213	0,01

**Tabla 11 Datos de la instalación variando el ángulo de inclinación Beta**

En la tabla podemos distinguir los siguientes términos:

- $\beta$ : es el ángulo de inclinación del captador.

- $\gamma$ : es el ángulo acimutal. Permanece constante y con valor igual a cero en todos los casos ya que la orientación será hacia el sur.

-A: es el área del captador en metros cuadrados. Permanece constante. Su valor es el adecuado para cubrir la fracción solar.

- $f_{\text{anual}}$ : la media anual de la fracción solar cubierta. No se incluye Agosto

-m: es el caudal de fluido que circula por cada uno de los colectores. Se opta por ese número por recomendación del fabricante.

- $\eta_{\text{medio}}$ : es el rendimiento medio anual de los colectores.

-Energía Producida: es la cantidad de energía que produce la instalación durante todo el año. Debido a que si varía en ángulo de incidencia, también cambia las horas de sol que recibe, se ha decidido multiplicar la potencia obtenida neta cada mes [W] por las horas de sol que recibe, y con ello se logra un parámetro independiente de la inclinación.

La ecuación es obtenida que se presenta a continuación está sacada del programa para dimensionar la instalación de ACS, que se adjunta en el anexo correspondiente.

$$Energia_{total\_produccio} := \left[ \sum_{i=1}^{12} \left( (Q_{col_i} \cdot h_{sT_i}) \right) \right] - (Q_{col_8} \cdot h_{sT_8}) = 2.221 \times 10^{10} \text{ J}$$

Siendo los términos contenidos en la ecuación:

- $Q_{col_i}$  la potencia térmica media obtenida diariamente en cada mes.

- $h_{sT_i}$  las horas de sol recibidas de media durante un día en cada mes.

- $Q_{col_8}$  la potencia térmica media obtenida diariamente en Agosto.

- $h_{sT_8}$  las horas de sol recibidas de media durante un día en Agosto.

-Energía Perdida: es la energía que se produce una vez se ha cubierto la demanda. Según el caso, se puede tener pérdidas uno o varios meses, cuando la fracción solar ya es mayor a 1.

$$Energia_{inutil} := Q_{col_7} \cdot h_{sT_7} \cdot (f_7 - 1) = 9.021 \times 10^8 \text{ J}$$

Siendo los términos contenidos en la ecuación:

- $Q_{col_7}$  la potencia térmica media obtenida diariamente en Julio.

- $h_{sT_7}$  las horas de sol recibidas de media durante un día en Julio.

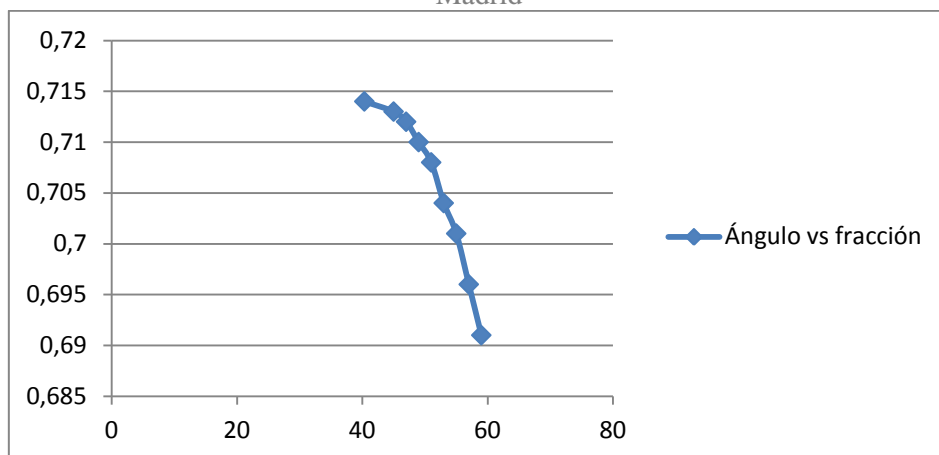
- $f_7$  la fracción solar cubierta durante un día en Julio.

Energía Neta: es la cantidad de energía útil que produce la instalación. Para obtenerla se ha de restar la energía que se desaprovecha de la producida.

$$Energia_{neta} := Energia_{total\_produccio} - Energia_{inutil} = 2.131 \times 10^{10} \text{ J}$$

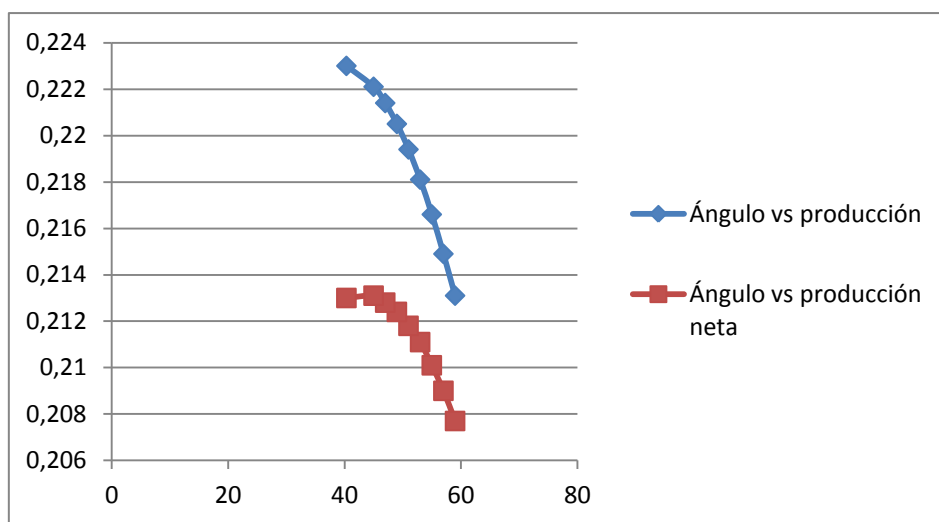
Siendo los términos contenidos en la ecuación los resultados obtenidos de las dos anteriores

Para ver de manera más clara los datos de la tabla y llevar a cabo un análisis que justifique la configuración que finalmente tendrá la instalación se elaboran las siguientes gráficas:



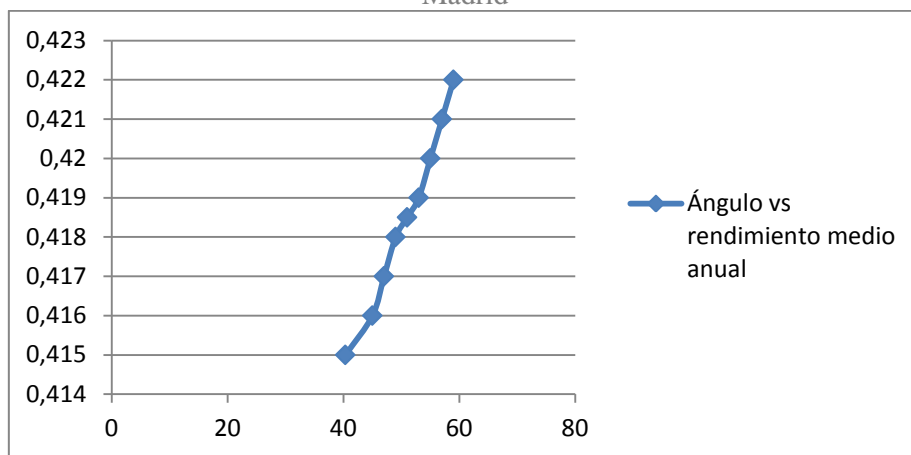
**Ilustración 49** Gráfica de la variación de la fracción solar frente al ángulo de inclinación de los captadores

Como se observa, la fracción más grande se cubre dejando los colectores inclinados un ángulo igual a la latitud. Conforme se aumenta el valor del ángulo se disminuye la fracción solar que se puede cubrir con la misma área de captación.



**Ilustración 50** Gráfica de la variación de la Producción Total y Neta frente al ángulo de inclinación de los captadores

En este caso, la producción total sigue siendo mayor para la inclinación anual, pero se observa que si se tienen en cuenta las pérdidas de energía que no son de provecho para el sistema, la inclinación a 45° es mejor.



**Ilustración 51 Gráfica de la variación del rendimiento medio anual frente al ángulo de inclinación de los captadores**

En esta comparativa se observa que al contrario que con la producción y la fracción solar, según aumentamos el ángulo de inclinación de captadores lo hace a su vez el rendimiento. Esto es debido principalmente a que el colector trabajará a menor temperatura.

A la vista del anterior análisis se opta por seleccionar el ángulo de inclinación a 45°, que aparte de tener una mayor producción neta, es más cómodo para orientar los colectores en los soportes.

Finalmente los datos de la instalación se adjuntan la siguiente tabla:

$\beta$ [°]	$\gamma$ [°]	Número captadores	A [m <sup>2</sup> ]	m [l/h]	$\eta_{\text{medio}}$	f <sub>anual</sub>
45	0	126	292.446	85	0,416	0,714

**Tabla 12 Configuración final de captadores ACS**

Una vez determinados los parámetros de la instalación es interesante comparar las tablas 65 y 67 del anexo 9.1.1, dónde se muestra mensualmente, la potencia térmica cubierta mediante energía solar y la potencia térmica demandada, respectivamente.

### 3.1.2 Cálculo de pérdidas de radiación solar

El código técnico de la edificación fija un porcentaje de pérdidas de radiación solar permisibles según el tipo de grado de integración arquitectónica en que se incluya la instalación.

Básicamente son tres tipos:

- Integración arquitectónica  
En el caso de que la instalación además de aportar energía tenga una utilidad arquitectónica, sustituyendo a algún elemento constructivo.
- Superposición arquitectónica.  
En el caso de que los captadores se instalen paralelos a la máxima pendiente de la cubierta sin estar situados horizontalmente.
- General  
En cualquier otro caso.

La presente instalación es de tipo general y tendrá que cumplir con los requisitos expuestos en la siguiente tabla.

Caso	Orientación e inclinación	Sombras	Total
General	10 %	10 %	15 %
Superposición	20 %	15 %	30 %
Integración arquitectónica	40 %	20 %	50 %

Ilustración 52 Pérdidas límite exigibles por el CTE. Referencia [6]

### 3.1.2.1 Cálculo de pérdidas de radiación solar debido a sombras

Para determinar la cantidad de radiación que deja de recibirse debido a sombras de edificios colindantes se hará un estudio en el tejado del polideportivo.

El edificio del polideportivo Alfredo Di Stéfano es colindante con el Auditorio Padre Soler, de forma que la altitud de este último hace que el tejado se vea afectado por su sombra, sobre todo en las últimas horas del día. Para estimar las pérdidas producidas por las sombras se procede a este análisis.

La altura concreta del elemento es desconocida, pero se supondrá entorno a los treinta metros para no infravalorar las pérdidas producidas por su sombra.

De la página de Google se extrae la siguiente instantánea, que servirá para medir los ángulos necesarios para estimar las pérdidas.

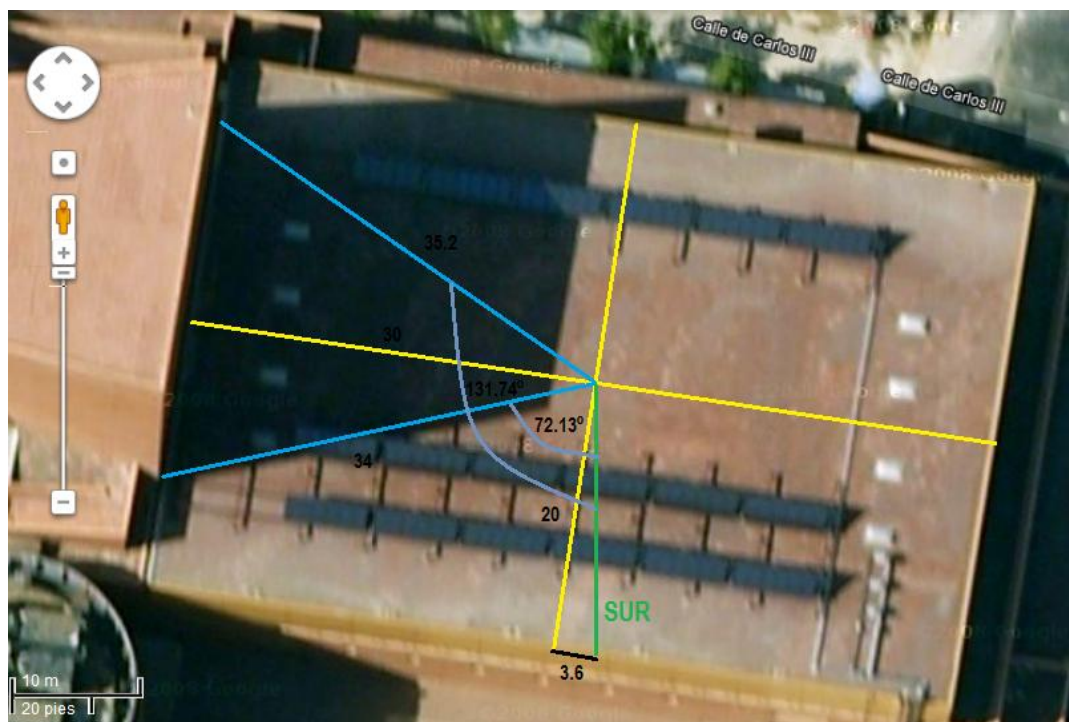
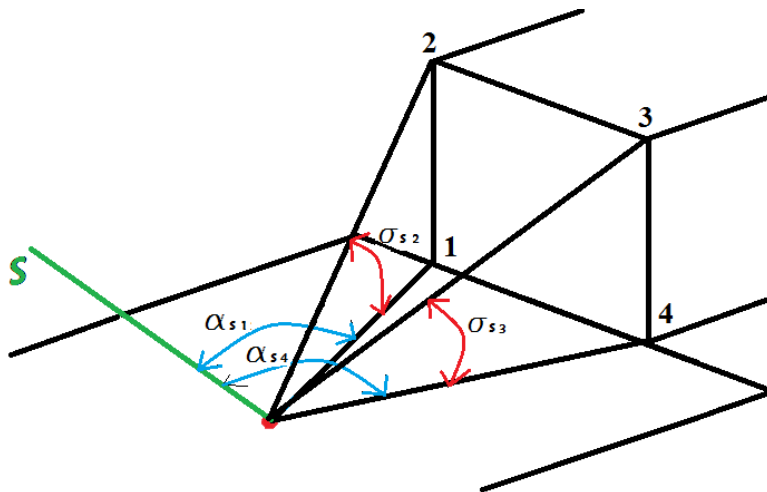


Ilustración 53 Ilustración 1 Fotografía del tejado superior del polideportivo.

Como se observa en la fotografía y haciendo uso de la escala del mapa, se han dibujado las líneas necesarias para obtener los ángulos requeridos para representar las pérdidas por sombras. El punto elegido es el centro del tejado, desde el cual se mide el ángulo desde la dirección sur hasta los cuatro puntos representativos de la fachada del auditorio.

A esos cuatro ángulos, hay que añadir los formados por los puntos representativos y el punto central, contenidos en el plano perpendicular al tejado.

Para ilustrar con claridad todos los ángulos se introduce el siguiente croquis.



**Ilustración 54** Esquema de los cuatro puntos y ángulos necesarios para la representación

Los ángulos  $\alpha_s$  son los formados entre los puntos representativos y el sur, dentro del plano del tejado y se denominarán ángulos acimutales. Los ángulos  $\sigma_s$  son los formados entre los puntos representativos y el plano del horizontal, dentro del plano perpendicular al tejado. Se denominarán elevación.

Con los valores obtenidos de los mismos, se representan en el diagrama de trayectorias aparentes del sol.

Valores de los ángulos:

Punto Representativo	1	2	3	4
Altura ( A )	0°	41,42°	40,44°	0°
Azimet/ sur ( Z )	72,13°	72,13°	131,74°	131,74°

**Tabla 13** Valores angulares de los puntos representativos.

Introduciendo los datos en el esquema, queda de la siguiente forma:



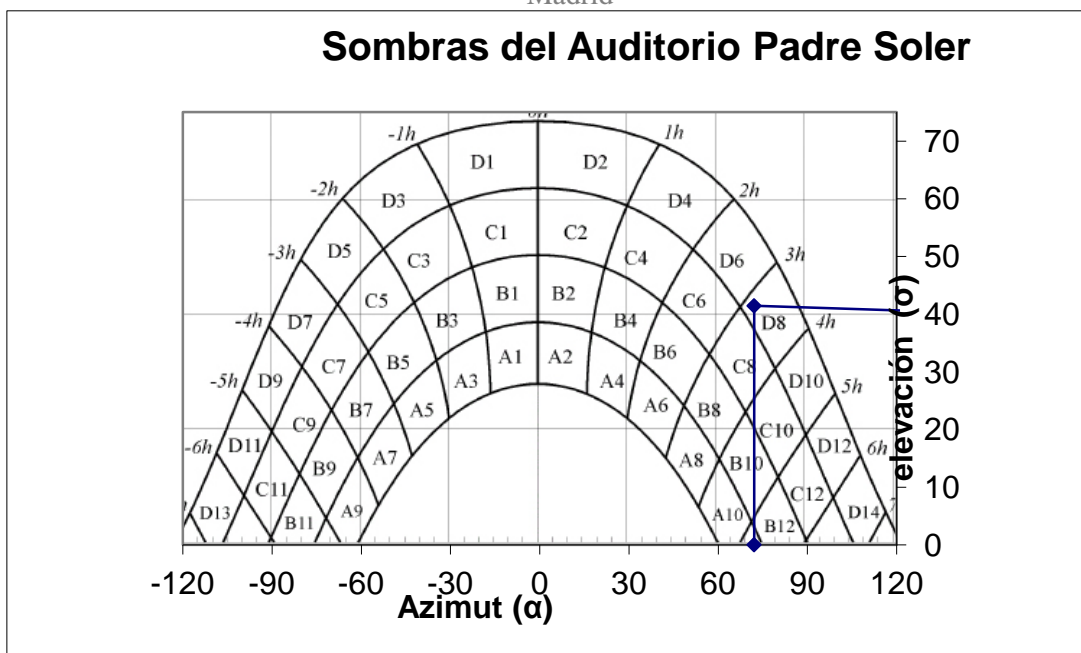


Ilustración 55 Diagrama de trayectorias aparentes del sol y representación de las sombras proyectadas por el auditorio Padre Soler

Una vez dibujado se consultan las tablas en función del ángulo de inclinación de los captadores  $\beta$  y el ángulo acimutal  $\alpha$ . Según queden cubiertos los recuadros del diagrama se multiplicaran los cuadrados afectados por 0.25, 0.5, 0.75 o 1.

B10	B12	C8
0,5	1	0,5
C10	C12	D8
0,75	1	0,75
D10	D12	D14
1	1	1

Tabla 14 Coeficientes usados en cada elemento diagrama de trayectorias aparentes

	$\beta=35^\circ ; \alpha=0^\circ$			
	A	B	C	D
13	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,01	0,12	0,44
9	0,13	0,41	0,62	1,49
7	1,00	0,95	1,27	2,76
5	1,84	1,50	1,83	3,87
3	2,70	1,88	2,21	4,67
1	3,17	2,12	2,43	5,04
2	3,17	2,12	2,33	4,99
4	2,70	1,89	2,01	4,46
6	1,79	1,51	1,65	3,63
8	0,98	0,99	1,08	2,55
10	0,11	0,42	0,52	1,33
12	0,00	0,02	0,10	0,40
14	0,00	0,00	0,00	0,02

Ilustración 56 Tabla de porcentaje de pérdidas para un ángulo de inclinación y acimutal concreto. Referencia [6]

Escogiendo la tabla más similar, para  $\beta=35^\circ$  y  $\alpha=0^\circ$  el total de pérdidas por sombras asciende a 4.9225%, valor muy inferior al límite del 10% del caso general.

#### 3.1.2.2 *Cálculo de pérdidas de radiación solar debido a inclinación y orientación de los captadores solares*

Las pérdidas por orientación e inclinación han de ser menores del 10% en este caso. Para calcularlas se hace uso de la siguiente fórmula, incluida en el pliego de condiciones.

$$\text{Pérdidas (\%)} = 100 \cdot \left[ 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (\beta - \beta_{\text{opt}})^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \alpha^2 \right] \quad \text{para } 15^\circ < \beta < 90^\circ$$

**Ilustración 57 Ecuación para hallar el porcentaje de pérdidas por inclinación y orientación. Referencia [6]**

Debido a que la demanda del polideportivo es muy constante a lo largo del año, exceptuando los dos meses de Julio y Agosto se hace la aproximación validada por el CTE de que el ángulo óptimo es igual a la latitud del lugar. De esta forma queda:

$-\alpha=0^\circ$  ángulo acimutal con valor nulo, captadores orientados al sur.

$-\beta=45^\circ$  ángulo de inclinación de los captadores.

$-\text{Latitud}=40^\circ 19' 35''$

$-\beta_{\text{opt}}=50^\circ 19' 35''$

$$\text{Pérdidas} = 100[1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (45^\circ - 40^\circ 19' 35'')^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0] = 0,2617\%$$

Siendo de nuevo el valor obtenido muy inferior al límite establecido en el CTE.

Las pérdidas totales ascienden al 5.184%, valor casi un tercio por debajo del máximo permitido por la suma de ambos casos.

#### 3.1.3 *Cálculo de la distribución de los captadores en el tejado y la distancia mínima entre filas*

El tejado disponible en el polideportivo es un rectángulo de aproximadamente 2480 m<sup>2</sup>. La fachada con orientación hacia el sur tiene una longitud de 62 metros, mientras que la fachada este cuenta con 40 metros.

Teniendo en cuenta el número total de captadores, 126, se procede a agruparlos en 21 subgrupos de 6. Con ello independizamos la instalación por grupos más pequeños, que en caso de fallo o rotura, no detendrían la instalación al completo.

El ancho de cada captador es de 1,056 metros, así que cada subgrupo de 6 tendrá una longitud igual a seis veces esa cantidad más una pequeña separación entre unidades. Suponiendo esa distancia de unos 20 centímetros, al total se le suma un metro más, quedando:

$$L_{\text{subgrupo}} = 1.056 \cdot 6 + 1 = 7.34 \text{ m}$$

Teniendo en cuenta que la longitud de la fachada son 62 metros y suponiendo un espacio aproximado de medio metro entre subgrupos entrarían los 7 subgrupos.

Al tener 21 subgrupos, múltiplo de 3 y 7, interesan tres filas de 7 subgrupos de captadores.

En cuanto a la distancia mínima, se calcula según el método propuesto en el pliego de condiciones técnicas para instalaciones de baja temperatura del IDAE.

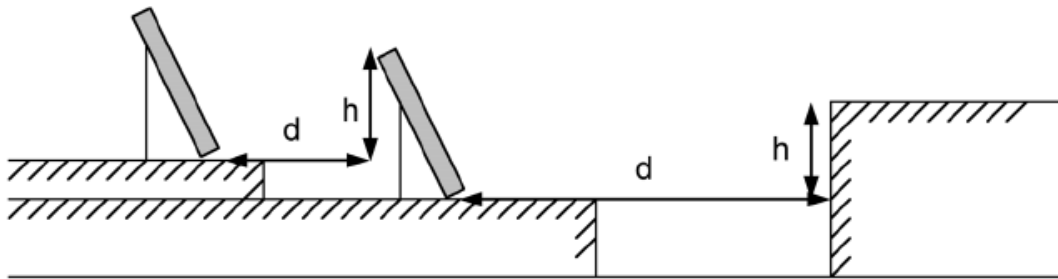


Ilustración 58 Esquema de separación entre filas y obstáculos. Referencia [7]

Para hallar la distancia  $d$  entre filas se recurre a la expresión:

$$d = \frac{h}{\tan(61^\circ - \text{Latitud})}$$

Dónde  $h$  es la altura del obstáculo, que en este caso será la proyección de la longitud de captador inclinado  $45^\circ$ .

$$h = L \cdot \sin(45^\circ) = 2.38 \cdot \sin(45^\circ) = 1.683 \text{ m}$$

Sustituyendo con los valores de la latitud:

$$d = \frac{1.683}{\tan(61^\circ - 40.33^\circ)} = 4.46 \text{ m}$$

Teniendo en cuenta que la proyección horizontal de los captadores es de 1.683 m

La cantidad máxima de filas que entrarían en el tejado serían 6.

El espacio restante se dedicará a los captadores de la climatización del agua de la piscina.

### 3.2 Cálculo del sistema de acumulación

Según el CTE para dimensionar el sistema de almacenamiento en una instalación ACS hay que cumplir la siguiente expresión:

$$50 < \frac{V}{A} < 180$$

**Ilustración 59** Expresión para dimensionado de almacenamiento. Referencia [6]

Dónde:

V es el volumen del acumulador expresado en litros

A es el área de captación expresada en metros cuadrados.

En el caso de la presente instalación:

$$50 < \frac{V}{A} < 180$$

$$50 \cdot 292,446 < V < 180 \cdot 292,446$$

$$14622,3 \text{ l} < V < 52640,28 \text{ l}$$

El volumen que se opta por instalar es el más próximo al límite inferior.

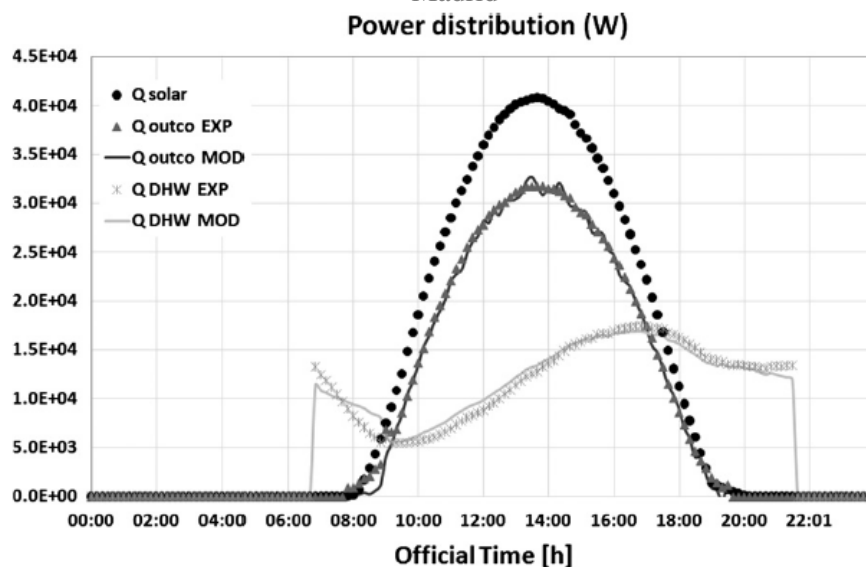
Si se quisiera dimensionar la acumulación para garantizar la demanda diaria, se tendría que instalar un acumulador de volumen igual o superior a la cantidad de litros que se consumen en un día en el caso más desfavorable del año, siendo éste para el presente diseño de al menos 17070 litros. Por razones de espacio se recurrirá a un volumen más pequeño.

Contando con las limitaciones mencionadas, se decide una configuración de cuatro acumuladores idénticos de 3500 litros conectados en serie. De esta manera se favorece la estratificación en los diferentes depósitos, además de simplificar las interconexiones entre ellos.

Los acumuladores seleccionados son de tipo vitrificado, modelo MVV3500RB del fabricante Lapesa. Sus características técnicas vienen en el anexo 9.2.3. Además se considera oportuno adquirir cubiertas térmicas que disminuyan pérdidas de calor al ambiente.

#### 3.2.1 Estudio de la capacidad de almacenamiento frente a la posible pérdida de fracción solar cubierta

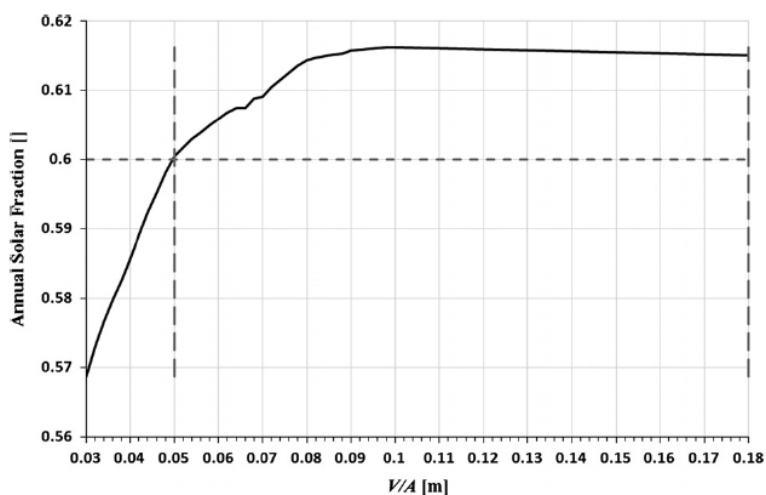
Debido a la falta de espacio en la sala de máquinas del polideportivo, no se puede instalar el sistema de almacenamiento determinado por diseño. Para hacer una evaluación del impacto que esto provoca en la instalación se ha recurrido al artículo de la revista Elsevier, que aparece en la Referencia [3]. En él se hace un estudio de cómo la disminución o aumento de la capacidad de almacenamiento del agua para una instalación termo solar afecta a la fracción solar cubierta. De manera que para un caso de edificio multifamiliar y a partir de los datos de demanda a lo largo del día, se lleva a cabo un análisis en régimen transitorio de la producción del agua caliente simultáneo a un análisis de la radiación recibida durante el día y de cómo afecta el volumen de agua almacenado.



**Ilustración 60** Análisis simultáneo de la demanda horaria y la radiación solar recibida en un día despejado. Referencia [3]

Los datos de radiación para elaborar la gráfica anterior han sido obtenidos en la planta solar ubicada en la Universidad Carlos III, la cual además está situada a escasos metros del polideportivo Alfredo Di Stéfano.

Con ello se consigue una curva similar a la siguiente:



**Ilustración 61** Variación de la fracción solar cubierta frente al cociente entre el volumen de almacenamiento y el área de captadores. Referencia [3]

Nótese que el comportamiento hasta la fracción solar de diseño es prácticamente lineal.

Basándose en la linealidad de este primer tramo y extrapolando la curva anterior al caso de la instalación en el polideportivo se puede determinar con una aproximación aceptable la cantidad de fracción solar que podría dejar de cubrirse anualmente. Para ello se hace lo siguiente:

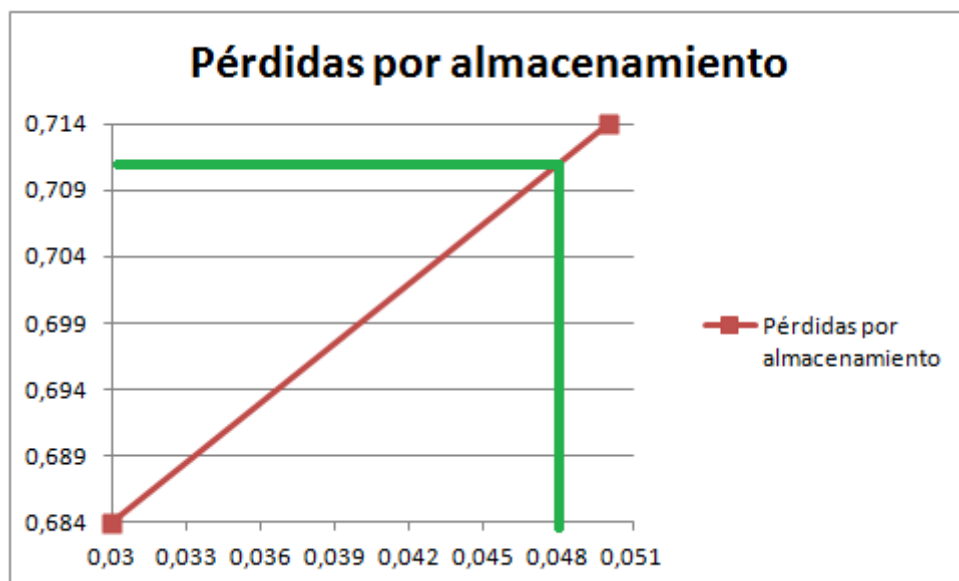


Ilustración 62 Gráfico extrapolado de las posibles pérdidas de fracción solar por falta de almacenamiento

El eje x representa el cociente entre los metros cúbicos del volumen de almacenamiento y el área de los captadores de la instalación en metros cuadrados.

En este caso el valor es:

$$4 \text{ depósitos por } 3500 \text{ l} = 14000 \text{ l} = 14 \text{ m}^3$$

$$\frac{V}{A} = \frac{14}{292.446} = 0.0479$$

Por lo tanto se admite una ligera pérdida, cubriendo un poco más del 0.71 de la fracción solar. No obstante, se sigue cubriendo más del porcentaje de demanda necesario, además, según la Referencia [1] cuando existe coincidencia entre el periodo de captación y consumo, hace la recomendación de acumular entre 35 y 50 litros por metro cuadrado de captador. La instalación del polideportivo responde a este tipo de desfase.

Por lo tanto se puede justificar el uso de depósitos más pequeños en esta instalación.

Finalmente, las características básicas del sistema de almacenamiento vienen resumidas en la tabla siguiente:

Fabricante	Modelo	Número de unidades	Altura [mm]	diámetro [mm]	Mantas Térmicas
Lapesa	MVV3500RB	4	2580	1660	Si

Tabla 15 Características del sistema de acumulación

### 3.3 Cálculo del sistema de intercambio

Para llevar a cabo el dimensionamiento del intercambiador entre el circuito primario y secundario en la instalación ACS, se escoge el caso más desfavorable del programa de dimensionamiento de ACS de Mathcad, que se da en el mes de Junio, cuando la instalación solar necesita intercambiar más potencia térmica con el agua de consumo.

Mediante el uso del programa Mathcad de dimensionamiento de intercambiadores, adjuntado y explicado en el 9.1.3, se introducen los parámetros pertenecientes a un intercambiador comercial, El modelo M3 del fabricante Alfa Laval, y a partir de ellos se obtendrá el tamaño, número y separación de las placas, además de las pérdidas de carga ocasionadas.

La eficiencia a la que trabajarán todos los intercambiadores se supone conocida y de valor constante  $\varepsilon = 0.5$ .

Fabricante	Modelo	Tipo de placa	Altura [mm]	Anchura [mm]	Espesor [mm]	conductividad [W/m·K]
Alfa Laval	T5B	H	553	150	0.5	13.4

Tabla 16 Datos del intercambiador comercial

Finalmente, los datos relevantes obtenidos tras el diseño se resumen en la siguiente tabla:

Potencia Intercambio [W]	Número de placas	Separación entre placas [mm]	Pérdida de Carga primario [Pa]	Pérdida de carga secundario [Pa]
56070	27	3	22220	21490

Tabla 17 Resultados del intercambiador del circuito ACS

Como se ve, las pérdidas en el intercambiador están por debajo del límite de 3 m.c.a. impuesto por la referencia [6] y [1]. Los datos técnicos del intercambiador vienen detallados en el anexo 9.2.2.

### 3.4 Cálculo del disipador de energía

Debido a la cantidad de área de captadores instalada para cubrir la demanda de ACS, junto con el descenso del consumo en los meses de verano, en el mes de Julio es imposible dejar de producir más del 110% de las necesidades netas de potencia térmica. Además, durante Junio, Julio y Septiembre se produce más del 100% del volumen de agua caliente necesaria. Por lo tanto, es indispensable la instalación de un dispositivo capaz de disipar el exceso de calor en el sistema.

Según las condiciones del fabricante, los aerotermos son capaces de disipar una potencia térmica dada para unas condiciones:



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

Tª agua 90°C, Tª aire 35°C, caudal másico variable en función del aparato.

De los ventiladores disponibles, seleccionamos el que presenta unas características más similares a las de la instalación, siendo el modelo BD 144 del fabricante Salvador Escoda.

Modelo	Q agua L/H	Tª Salida °C	P.C. m.c.d.a.	Ventilador Nº x Pot. W 220V II	Dimensiones (mm) L x H x A
BD 72	5.400	77,18	1,37	1 x 330	237 x 950 x 1065
BD 80	6.000	76,96	1,23	1 x 500	237 x 1065 x 1165
BD 96	7.200	78,19	1,32	1 x 560	237 x 1065 x 1165
BD 112	8.400	77,79	0,72	2 x 420	237 x 1165 x 1290
BD 120	9.000	76,86	0,87	2 x 500	237 x 1165 x 1290
BD 144	10.800	78,00	1,04	2 x 550	237 x 1290 x 1385
BD 160	12.000	77,44	1,17	2 x 520	430 x 1290 x 1385
BD 184	13.800	77,69	1,41	2 x 520	430 x 1320 x 1485
BD 200	15.000	77,2	1,54	4 x 250	430 x 1420 x 1595
BD 224	16.800	77,55	1,79	4 x 420	430 x 1490 x 1645

\* Condiciones de cálculo: T. entrada del fluido 90°C; T. entrada del aire 35°C

### Ilustración 63 Modelos de aerotermos. Referencia [34]

Suponiendo que la temperatura del aire de utilización es 35°C, sustituyendo los datos de caudal y propiedades del fluido calo portador de la instalación ACS se puede obtener la disminución de temperaturas real y la potencia térmica que es capaz de disipar:

Haciendo un balance de energía en el disipador:

$$Potencia\ disipada = \dot{m}_{agua} \cdot \rho_{agua} \cdot C_{agua} \cdot (T_{e\ agua} - T_{s\ agua})$$

Siendo

- $\dot{m}_{agua}$  el caudal propuesto por el fabricante.
- $\rho_{agua}$  la densidad del agua.
- $C$  el valor del calor específico del agua.
- $T_{e\ agua}$  la temperatura de entrada del agua que pone en funcionamiento el aerotermo.
- $T_{s\ agua}$  la temperatura de salida del agua con el aerotermo funcionando.

$$Potencia\ disipada \approx 10,8 \cdot 992 \cdot 4180 \cdot (90 - 78) \approx 149,38\ kW$$

Igualando la potencia que es capaz de disipar con agua con las propiedades del fluido calo portador:

$$Potencia\ disipada = \dot{m}_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1 \cdot (T_{e\ 1} - T_{s\ 1})$$

Siendo

- $\dot{m}_1$  el caudal de fluido en el circuito primario.
- $\rho_1$  la densidad del fluido del primario.
- $C_1$  el valor del calor específico del fluido del primario.

-  $T_{e1}$  la temperatura de entrada que pone en funcionamiento el aerotermo.

-  $T_{s1}$  la temperatura de salida del fluido con el aerotermo funcionando.

$$(T_{e1} - T_{s1}) = \frac{\text{Potencia disipada}}{\dot{m}_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1} = \frac{149380}{10.71 \cdot 1015 \cdot 3850} = 12,85^\circ\text{C}$$

Si se eligiera que la temperatura a la que entra en funcionamiento es  $90^\circ\text{C}$ , a la salida el fluido circularía a  $77,15^\circ\text{C}$ .

Según las necesidades de evacuar calor se programa la temperatura a la que empieza a funcionar el sistema de disipación, provocando un descenso de ésta entorno a  $12^\circ\text{C}$ .

El dispositivo genera una pérdida de carga similar a la que indica el fabricante e igual a 1,04 m.c.a.

Los datos relativos al aerotermo vienen resumidos en la siguiente tabla:

Fabricante	Modelo	Número de ventiladores	Potencia ventilador [W]	Alto [mm]	Ancho [mm]	Largo [mm]
Salvador Escoda	BD 144	2	550	1390	1290	237

Tabla 18 Datos del aerotermo del circuito primario de ACS

Las características técnicas vienen detalladas en el anexo 9.2.7.

### 3.5 Cálculo del sistema hidráulico

Como se ha mencionado anteriormente, el circuito hidráulico lo conforman las tuberías, bombas, vasos de expansión, válvulas etc. Que permiten la circulación de los fluidos por el circuito primario y secundario.

Las dimensiones de los diámetros del sistema de tuberías son normalizadas y se han diseñado para cumplir la exigencia de tener menos de 40mm.c.a de pérdida de carga por metro de tubería.

#### 3.5.1 Descripción del sistema de tuberías

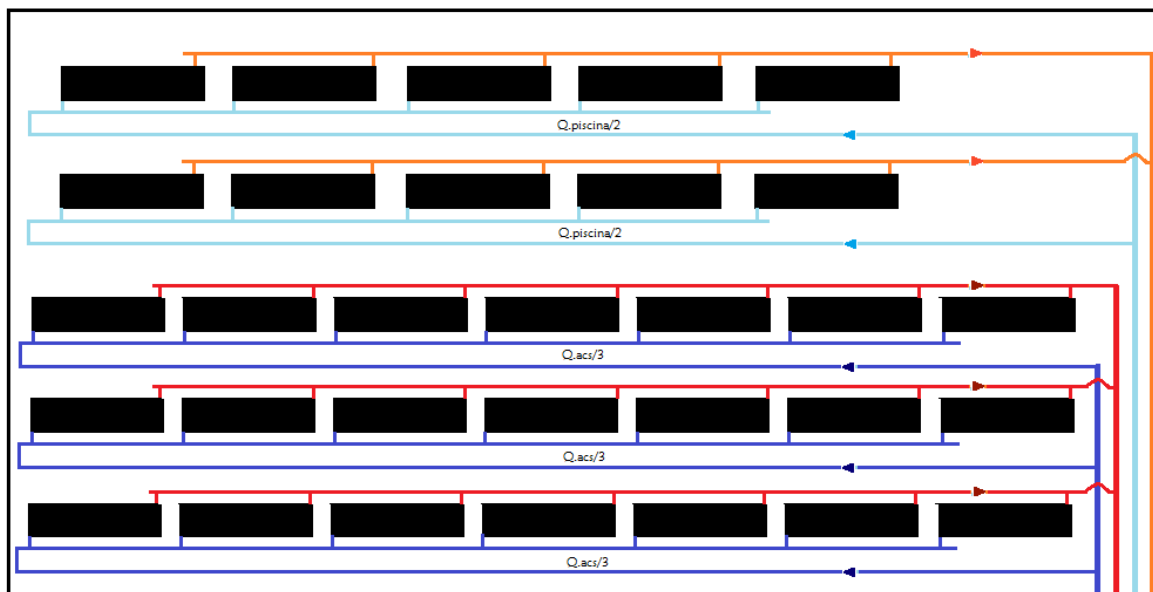
Se deberá diseñar lo más corto posible, con el fin de evitar pérdidas térmicas y de presión a lo largo de los conductos.

##### 3.5.1.1 Circuito primario

Discurre una pequeña parte por la sala de máquinas la gran mayoría por el exterior del edificio.

En la siguiente imagen se muestra un esquema simplificado de la distribución de colectores y tuberías en el tejado. La diferencia de distanciamiento entre filas que se ve es sólo para

distinguir bien las dos instalaciones, pero realmente las filas de los captadores para calentar el agua de la piscina se sitúan a continuación de las de ACS y con la misma distancia entre filas.



**Ilustración 64** Esquema de distribución de captadores y tuberías en el tejado

La distribución del fluido a través del circuito primario de ACS se hace en el siguiente orden:

El fluido es impulsado por la bomba desde la sala de máquinas, y sube en dirección vertical por una tubería de distribución hasta el tejado, que tiene un desnivel de unos 20 metros. En el tejado, se mueve por una de las tres líneas en paralelo, compuestas por 7 baterías de 6 colectores también unidos en paralelo entre sí. Para asegurar que el circuito está equilibrado, las tuberías se disponen con retorno invertido. Después, a través de otra tubería de distribución retorna hasta el intercambiador de calor situado en la sala de máquinas.

Teniendo en cuenta el caudal de fluido que circula en cada caso, se divide el circuito principal en 7 tramos diferentes:

Cada una de las tres líneas es un tramo distinto, las tuberías desde el intercambiador hasta el tejado forman otro tramo, al igual que las tuberías desde el tejado que retornan al intercambiador. Los otros dos tramos son las dos tuberías que unen las dos últimas líneas de baterías de colectores, tanto a la ida como a la vuelta.

Los tramos con sus longitudes, diámetros, caudales y diferencias de cota se pueden ver en la siguiente tabla resumen:

Tramo	Diámetro [mm]	Caudal [m³/h]	Longitud [m]	$\Delta H$ [m]
1	54	10,711	27	20
2	42	3,570	149	1,7
3	54	5,356	6,5	0
4	42	3,570	149	1,7
5	42	3,570	165	1,7
6	54	5,356	6,5	0
7	54	10,711	27	20

**Tabla 19** Características de los tramos de tubería del circuito primario de ACS

Para el circuito se ha de colocar:

- 1 válvula anti retorno.
- 2 válvulas de esfera por cada batería de captadores, de manera que se puedan independizar de las líneas principales. Además de situar una a la entrada y salida de cada tramo.
- El menor número posible de codos a 90° y uniones en T. Se contabilizan en el tramo con menor caudal.

Reuniendo el total de elementos en la siguiente tabla:

Tramo	Diámetro [mm]	Válvulas de esfera	Codos 90°	Uniones T	Válvula Anti retorno
1	54	2	4	0	1
2	42	16	4	15	0
3	54	2	0	0	0
4	42	16	4	15	0
5	42	16	4	15	0
6	54	2	0	0	0
7	54	2	4	0	0

Tabla 20 Elementos del circuito primario ACS

### 3.5.1.2 Circuito secundario

Se encuentra íntegramente en la sala de máquinas, de la cual se añade una ilustración con el circuito secundario simplificado.

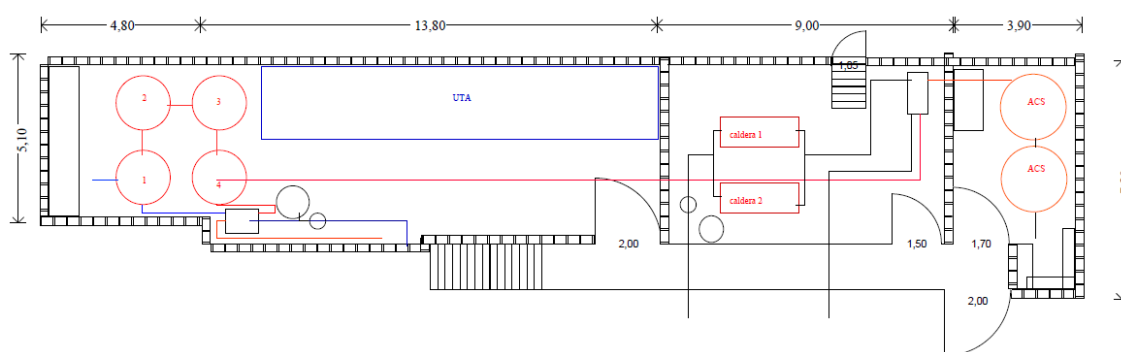


Ilustración 65 Esquema de la sala de máquinas, parte ACS

La distribución del fluido a través del circuito secundario de ACS se hace en el siguiente orden:

El agua entra de la red a través del depósito número 1, con un caudal igual al de consumo. Del mismo depósito una bomba impulsa fluido a través de una tubería hacia el intercambiador de calor. A la salida del intercambiador, otra tubería redirige el caudal hacia el depósito 4. Desde este depósito, parte del agua es recirculada al siguiente depósito y parte, con un caudal igual al de consumo, es enviada hacia el sistema auxiliar y almacenaje.

Teniendo en cuenta los caudales, se divide en circuito en 5 tramos diferentes:

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

Las tuberías que conectan cada depósito serán un tramo, la tubería de ida y vuelta del intercambiador será otro, y el tramo que va desde el último depósito hasta el almacenaje, pasando por el sistema auxiliar será el último.

Los tramos con sus longitudes, diámetros, caudales y diferencias de cota se pueden ver en la siguiente tabla resumen:

Tramo	Diámetro [mm]	Caudal [m <sup>3</sup> /h]	Longitud [m]	$\Delta H$ [m]
1	54	10,960	2,5	1.8
2	54	10,960	2,5	1.8
3	54	10,960	2,5	1.8
4	54	10,960	8	1.8
5	54	1,227	29	2.4

Tabla 21 Características de los tramos de tubería del circuito secundario de ACS

Al igual que en el circuito primario, se colocan las válvulas, codos y uniones pertinentes, añadiendo además las posibles entradas y salidas a depósitos.

Reuniendo el total de elementos en la siguiente tabla:

Tramo	Diámetro [mm]	Válvulas de esfera	Codos 90°	Entrada	Salida	Válvula Anti retorno
1	54	2	2	1	1	0
2	54	2	2	1	1	0
3	54	2	2	1	1	0
4	54	2	4	1	1	1
5	54	2	6	1	1	0

Tabla 22 Elementos del circuito secundario ACS

El caudal del último tramo ha sido dimensionado para el gasto de consumo más alto de todos los meses. Una vez el circuito secundario llega a los depósitos ACS, es otra bomba la encargada de distribuir el agua de consumo a todos los puntos del polideportivo. La instalación ya cuenta con la red de distribución anterior y por lo tanto aquí no se dimensiona.

### 3.5.2 Aislamiento

Según el pliego de condiciones de instalaciones de baja temperatura del IDAE, debido a que el fluido que circula por las tuberías lo hace a una temperatura superior a 40°C, las tuberías que discurren tanto por dentro como por fuera del edificio, deberán ser correctamente aisladas. Con ello se disminuye la potencia térmica desaprovechada en la instalación.

Basándonos en la siguiente tabla se puede ver los milímetros de espesor de aislante con las condiciones de conductividad térmica de  $K=0.04$  [W/m·K] necesarios en función del diámetro de la tubería. Si la conductividad fuera diferente, el espesor ha de ser tal que sea equivalente al de la presente tabla.

Fluido interior caliente			
Diámetro exterior (mm) (*)	Temperatura del fluido (°C) (**)		
	40 a 60	61 a 100	101 a 180
$D \leq 35$	25	25	30
$35 < D \leq 60$	30	30	40
$60 < D \leq 90$	30	30	40
$90 < D \leq 140$	30	40	50
$140 < D$	35	40	50

(\*) Diámetro exterior de la tubería sin aislar.

(\*\*) Se escoge la temperatura máxima de red.

**Ilustración 66** Tabla de espesores de aislamiento mínimos para tuberías que discurren por el interior.  
Referencia [7]

Si la tubería discurre por el exterior, los valores se aumentan al menos en 10 mm.

Cuando la instalación funciona en condiciones normales, las temperaturas no deberían exceder los 100°C en ningún caso.

Los metros totales de aislante para interior y exterior, tanto en circuito primario como secundario, con sus respectivos espesores de aislante se clasifican en la siguiente tabla:

Circuito	Disposición	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Espesor [mm]
primario	Interior	54	14	30
primario	Exterior	54	53	40
primario	Exterior	42	463	40
secundario	Interior	54	44.5	30

**Tabla 23** Espesores y longitudes de aislante para ACS

### 3.5.3 Cálculo de bombas de circulación

Para el dimensionamiento correcto de las bombas, tanto de circuito primario como de secundario, es necesario obtener las pérdidas de carga originadas en la instalación.

Debido a que la instalación cuenta con más de 50 m<sup>2</sup> de captadores, para el circuito primario y secundario será obligatorio montar dos bombas idénticas en paralelo, guardando una de ellas de reserva aunque puedan alternar su uso indistintamente.

Las bombas serán siempre montadas en la parte más fría de todo el circuito.

### 3.5.3.1 Cálculo de pérdidas de carga en tuberías

Para el cálculo de las pérdidas de carga en de todos los tramos del circuito, tanto primario como secundario, se ha hecho uso de la hoja de Mathcad de pérdidas de carga en tuberías, que se adjunta y explica, mediante el ejemplo de resolución de un tramo ejemplo, en el anexo 9.1.4.

Por lo tanto aquí simplemente se va a resumir los datos obtenidos para cada tramo y los totales: Para el circuito primario de ACS al estar situados los captadores y las líneas de baterías de captadores en paralelo, sólo es necesario ver las pérdidas de carga por el recorrido más desfavorable. Éste, es el formado por el tramo 1, 3, 5, 6 y 7.

Tramo	Velocidad [m/s]	Reynolds	f	Pérdidas Primarias [Pa]	Pérdidas Secundarias [Pa]	Total Pérdidas [Pa]
1	1,423	61180	0,02	10810	6559	17369
3	0,711	30590	0,0235	817	102	919
5	0,789	26310	0,0243	23450	4959	28409
6	0,711	30590	0,235	817	102	919
7	1,423	61180	0,02	10810	1201	12011

Tabla 24 Pérdidas de carga en conductos del circuito primario ACS

El total de pérdidas es la suma de todos los tramos, en este caso:

$$\text{Pérdidas tuberías circuito primario} = \sum \text{Total pérdidas} = 59627 \text{ Pa}$$

Las pérdidas características del circuito secundario:

Tramo	Velocidad [m/s]	Reynolds	f	Pérdidas Primarias [Pa]	Pérdidas Secundarias [Pa]	Total Pérdidas [Pa]
1	1,456	107700	0,0179	910	2003	2913
2	1,456	107700	0,0179	910	2003	2913
3	1,456	107700	0,0179	910	2003	2913
4	1,456	107700	0,0179	2913	3718	6631
5	0,866	32270	0,0263	9490	1361	10851

Tabla 25 Pérdidas de carga en conductos del circuito secundario ACS

$$\text{Pérdidas tuberías circuito secundario} = \sum \text{Total pérdidas} = 26221 \text{ Pa}$$

### 3.5.3.2 Cálculo de pérdidas de carga en intercambiadores

Según los programas de cálculo para intercambiadores, se obtienen las siguientes pérdidas:

Intercambiador Circuito primario-secundario ACS	Perdida de carga [Pa]
Fluido caliente	22220
Fluido frío	21490

Tabla 26 Pérdidas de carga intercambiador primario-secundario ACS

En el circuito secundario, se encuentra además el intercambiador de calor del circuito auxiliar. Como se desconocen los datos del mismo, se le supone una pérdida de carga similar al intercambiador antes descrito, debiéndose de sumar como pérdida para el dimensionamiento de la bomba del circuito secundario.

### 3.5.3.3 Cálculo de pérdidas de carga en colectores

Para calcular las pérdidas de carga debido a los colectores sólo será necesario tener en cuenta dichas pérdidas para una unidad, ya que todas se encuentran situadas en paralelo.

Por tanto, se recurre a la documentación del fabricante, que suministra una gráfica donde se puede ver la pérdida de carga en el colector según el caudal circulante por el mismo.

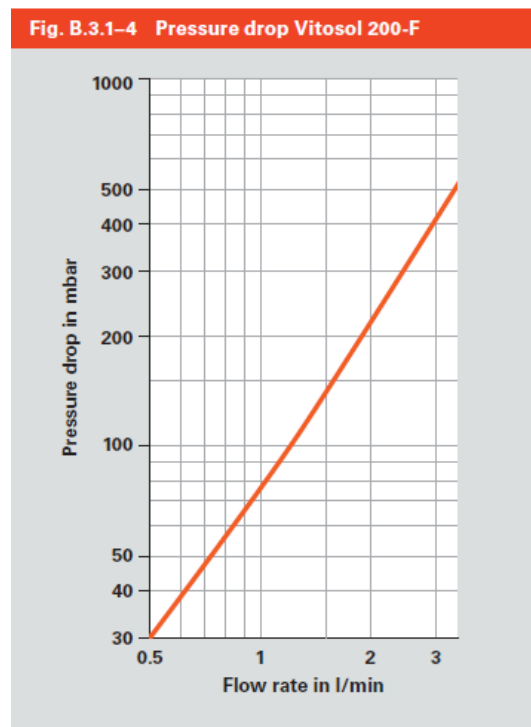


Ilustración 67 Caída de presión en el colector en función del caudal. Referencia [36]

Para un caudal de 85 l/h de fluido calo portador, la caída de presión es aproximadamente 140mbar, lo que equivale a 14000 Pa.

Para dimensionar las bombas son necesarios dos datos, el caudal y la diferencia de altura a vencer.

La diferencia de altura será igual de la diferencia de cotas entre el punto más alto del circuito y el más bajo, sumado a la caída de presión expresada en términos de altura.

$$\Delta H_{bomba} = \Delta H_{cotas} + \Delta H_{pérdidas}$$

Para el circuito primario la suma de todas las pérdidas de carga es igual:

$$Pérdidas\ primario = Pérdidas\ tuberías + pérdida\ intercambiador + Pérdida\ colector$$

$$Pérdidas\ primario = 59627 + 22220 + 14000 = 95847\ Pa$$





## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

Habría que sumar también la pérdida de carga en el disipador, que valía 1,04 m.c.a según el fabricante, para lo cual convertimos todo a m.c.a.

Convirtiendo las pérdidas de Pascales a altura en metros:

$$\Delta H_{pérdidas} = \frac{P}{\rho \cdot g} = 9.63 \text{ m}$$

Siendo

-  $\rho$  la densidad del fluido circulante, en este caso agua más propilenglicol.

-  $g$  el valor de la aceleración de la gravedad,  $9.8 \text{ m/s}^2$

$$\Delta H_{bomba} = 21,7 + 9.63 + 1,04 = 32.37 \text{ m}$$

Se requerirá por tanto una bomba que impulse un caudal igual al del circuito primario,  $10,71 \text{ m}^3/\text{h}$  a una altura de  $32,37 \text{ m}$ .

Para el circuito secundario la suma de todas las pérdidas de carga es igual:

$$Pérdidas_{secundario} = Pérdidas_{tuberías} + pérdida_{intecambiadores}$$

$$Pérdidas_{secundario} = 26221 + 21490 + 21490 = 69201 \text{ Pa}$$

Convirtiendo las pérdidas de Pascales a altura en metros:

$$\Delta H_{pérdidas} = \frac{P}{\rho \cdot g} = 7,12 \text{ m}$$

Siendo

-  $\rho$  la densidad del fluido circulante, en este caso agua.

-  $g$  el valor de la aceleración de la gravedad,  $9.8 \text{ m/s}^2$

$$\Delta H_{bomba} = 2,5 + 7,12 = 9.62 \text{ m}$$

Se requerirá por tanto una bomba que impulse un caudal igual al del circuito secundario,  $10,96 \text{ m}^3/\text{h}$  a una altura de  $9,62 \text{ m}$ .

Para cubrir estas necesidades de bombeo se recurre a las bombas comerciales:

Para el circuito primario se usarán dos bombas en paralelo del modelo TP 40-360 del fabricante Grundfos. Para el circuito secundario se usarán dos bombas en paralelo del modelo TP 40-180 del mismo fabricante. Los datos quedan resumidos en la siguiente tabla:

Fabricante	Modelo	Cantidad	Altura bomba [m]	Caudal bomba [m <sup>3</sup> /h]	Rendimiento	Potencia Consumida [kW]
Grundfos	TP 40-360	2	32,37	10,71	47,5%	2,5
Grundfos	TP 40-180	2	9,62	10,96	62%	0,5

Tabla 27 Datos de las bombas del circuito primario y secundario de ACS

Las curvas de las bombas referentes que contienen los datos referentes a estos modelos se adjuntan en el anexo 9.2.6.

### 3.5.4 Cálculo del vaso de expansión

Para el correcto dimensionamiento del vaso de expansión se va a hacer uso de la norma UNE 100-155.

La ecuación que define en volumen será:

$$V_t = V \cdot C_e \cdot C_p$$

Donde

- $V_t$  es el volumen total del vaso.
- $V$  el volumen inicial de fluido en el circuito.
- $C_e$  es el coeficiente de expansión.
- $C_p$  es el coeficiente de presión.

$V$  se calcula sumando todos los volúmenes de líquido calo portador del circuito primario, siendo el resultado:

$$V = V_{captadores} + V_{tuberías} \cdot V_{intercambiador}$$

El volumen de captadores,  $V_{captadores}$  es la suma de los litros contenidos en todos los captadores del circuito.

El fabricante indica que por captador el volumen de fluido contenido es igual a 1.83 l

Luego, con un número total de captadores igual a 126, se obtiene:

$$V_{captadores} = 1.83 \cdot N_{captadores} = 1.83 \cdot 126 = 230.58 \text{ l}$$

El volumen de fluido en las tuberías dependerá del diámetro interior de las mismas y de su longitud. Atendiendo al esquema de la distribución de las mismas se tiene:

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

Longitud total D=54mm	Longitud total D=42mm
67 m	463 m

**Tabla 28 Longitudes totales de tuberías en el circuito primario ACS**

Con lo que el volumen total de líquido contenido en la red de tuberías será igual a:

$$V_{tuberías} = \frac{\pi \cdot [(D)_{interior\ 54}]^2}{4} \cdot L_{total\ 54} + \frac{\pi \cdot [(D)_{interior\ 42}]^2}{4} \cdot L_{total\ 42}$$

Siendo

- $D_{interior}$  los diámetros interiores correspondientes para las tuberías de 54 mm y 42mm, en metros.
- $L_{total}$  las longitudes totales de todos los tramos de tuberías para cada diámetro, en metros.

$$V_{tuberías} = \frac{\pi \cdot (0.0516)^2}{4} \cdot 67 + \frac{\pi \cdot (0.04)^2}{4} \cdot 463 = 0,1401 + 0,5818 = 0,72193\ m^3$$

$$V_{tuberías} = 0,72193\ m^3 = 721,93\ l$$

El volumen de fluido en el intercambiador será muy pequeño en comparación con el resto de la instalación, aun así se calcula de la siguiente forma:

$$V_{intercambiador} = V_{entre\ placas} \cdot \frac{N_{canales}}{2}$$

Siendo

- $V_{entre\ placas}$  el volumen que hay entre dos placas, por las que circulará el fluido. Dependerá de la anchura, longitud y separación entre placas.

- $N_{canales}$  es el número total de canales por los que circulan los fluidos que intercambian calor.

$$V_{intercambiador} = 0,207\ l \cdot \frac{26}{2} = 2,69\ l$$

El volumen total del fluido de la instalación ser

$$V = 230,58 + 721,93 + 2,69 = 955,2\ l$$

El coeficiente de expansión representa la relación entre la variación de volumen experimentada por el fluido al aumentar su temperatura y el volumen inicialmente ocupado por el fluido. Es siempre positivo y menor que la unidad. En la norma dejan la siguiente expresión para calcularlo, en función de la diferencia de temperaturas y la concentración de anticongelante.

Para agua con diferencias de temperatura entre 70°C y 140°C usa la siguiente ecuación:

$$C_e = (-33,48 + 0,738 \times t) \times 10^{-3}$$

**Ecuación 1 Coeficiente de expansión para agua. Referencia [41]**



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

Para una diferencia media de temperaturas estimada en 100°C, el valor del coeficiente es:

$$C_{e\text{ agua}} = 0.04032$$

Como el fluido calo portador tiene una proporción de anticongelante, se tiene que multiplicar la expresión anterior por un factor de corrección que se obtiene con las siguientes expresiones.

$$f_c = a \times (1,8 \times t + 32)^b$$

**Ecuación 2 Factor de corrección del coeficiente de expansión. Referencia [41]**

Siendo a y b respectivamente, en función del porcentaje de anticongelante G, 35% en este caso:

$$a = -0,0134 \times (G^2 - 143,8 \times G + 1918,2)$$

$$b = 3,5 \times 10^{-4} \times (G^2 - 94,57 \times G + 500)$$

**Ecuación 3 Expresiones de los términos para obtener el factor de corrección. Referencia [41]**

Sustituyendo el valor de G en la ecuación anterior, e introduciendo los resultados en la del factor de corrección, se obtiene:

$$f_c = 1,58344$$

Por lo tanto, el coeficiente de expansión para el fluido en este caso será:

$$C_e = C_{e\text{ agua}} \cdot f_c = 0.04032 \cdot 1,58344 = 0.06384$$

El coeficiente de presiones se obtiene con la siguiente expresión, para un vaso sin diafragma:

$$C_p = \frac{P_{max} + 1}{P_{max} - P_{min}}$$

- $P_{max}$  la presión de funcionamiento máxima admisible en el vaso en bar.

- $P_{min}$  la presión mínima en el vaso en bar.

La presión máxima tiene que ser inferior a la presión de tarado de la válvula de seguridad. Aproximadamente entre 0.3-0.5 bar más pequeña.

La válvula de seguridad se supondrá que está tarada para una presión 1 bar inferior a la máxima soportada por los captadores, en este caso la presión de la válvula de seguridad vale 5 bar.

$$P_{max} = P_{válvula\text{ seguridad}} - 0.5 = 5 - 0.5 = 4.5\text{ bar}$$

La presión mínima debe ser lo suficientemente grande para evitar la entrada de aire al circuito, por lo que se recomienda que su valor sea 0.5 bar superior a la presión atmosférica en el punto más alto de la instalación. Al situarse el vaso en el punto más bajo del circuito, se ha de sumar la presión estática correspondiente a la presión mínima de manera que:

$$P_{estática} = h \text{ (m)} \cdot 0.1 \left( \frac{\text{bar}}{\text{m}} \right) = 20 \cdot 0.1 = 2 \text{ bar}$$

$$P_{min} = P_{estática} + 0.5 \text{ bar} = 2.5 \text{ bar}$$

Sustituyendo en la expresión del coeficiente de presiones queda:

$$C_p = \frac{P_{max} + 1}{P_{max} - P_{min}} = \frac{4.5 + 1}{4.5 - 2.5} = 2.75$$

Por lo que el volumen total del vaso de expansión será:

$$V_t = V \cdot C_e \cdot C_p = 955,2 \cdot 0,06384 \cdot 2,75 = 167,7l$$

Según el CTE el sistema de expansión debe ser tal que sea capaz de absorber la expansión del fluido contenido en tuberías y captadores multiplicado por 1.1, luego el volumen total será:

$$V_t = 1,1 \cdot 167,7l = 184.45 l$$

Los vasos de expansión destinan la mitad del vaso a volumen de agua y la otra mitad al aire que compensa las diferencias de presión, luego el depósito que cumple los requisitos debe ser mayor o igual a 370 l. En un catálogo comercial, se selecciona el modelo 500 AMR del fabricante Salvador Escoda. Los datos relevantes del vaso se resumen en la siguiente tabla, y los demás datos técnicos se adjuntan en el anexo 9.2.5:

Fabricante	Modelo	Volumen	Altura [mm]	Diámetro [mm]
Salvador Escoda	500 AMR	500 l	2065	600

**Tabla 29 Datos del vaso de Expansión ACS**

El circuito secundario no necesita vaso de expansión en este caso, porque debido al gran volumen de agua almacenada se procede a dejar suficiente espacio en los depósitos para absorber los posibles cambios de volumen del agua.

### 3.6 Cálculo del sistema auxiliar

Como se había mencionado en el capítulo 1, el polideportivo ya cuenta con el sistema auxiliar al completo, que es capaz de asumir el suministro de calor tanto para el agua caliente, como para la climatización del agua de la piscina.

Por lo tanto no se procede a calcular ningún elemento, sólo se hará una pequeña descripción de las calderas y su conexionado con la instalación solar.

El sistema auxiliar cuenta con dos calderas de gas, modelo CPA-600 del fabricante Roca. La potencia útil de cada una de las dos calderas es 697,7 kW, las cuales trabajan con un rendimiento a máxima potencia del 92.3%, según las especificaciones técnicas del fabricante.

Las calderas trabajan en paralelo, siendo frecuente el uso de ellas alternativamente.

La manera de aportar calor a los circuitos, tanto de ACS como climatización de la piscina, es mediante un circuito de agua cerrado, la cual se calienta haciendo uso de una de las calderas hasta lograr la temperatura deseada. Mediante intercambiadores de calor, uno para ACS y otro para la piscina, se logra contrarrestar el posible déficit de temperatura que pudiera darse en ambos circuitos antes de su utilización.

Por lo tanto, si se detecta que el agua destinada a ACS llega por debajo de una temperatura próxima a 60°C al intercambiador del circuito de calderas con el circuito ACS, se hace circular por el intercambiador el agua hasta conseguir superar esa temperatura, ya que luego es almacenada en los depósitos previos al consumo para evitar problemas de Legionela. Si el agua llega con suficiente temperatura, se hace un bypass en el circuito que evita el intercambio.

Para el agua de la piscina sucederá algo parecido, sólo que la temperatura que haga circular el agua por el intercambiador será inferior, y como se verá más adelante, diferente según el mes.

Puede parecer a priori que la capacidad de la caldera es muy superior a la necesaria, pero se puede justificar de la siguiente forma:

Si fuese necesario calentar el agua de los depósitos de ACS en enero, sin disponer de energía solar y en un tiempo razonable se puede plantear el siguiente balance de energía:

$$P_{ACS} = \frac{V_{ACS} \cdot \rho_{agua} \cdot C_{p\ agua} \cdot (T_{suministro} - T_{agua\ red})}{t}$$

Siendo

- $V_{ACS}$  el volumen total de agua que cabe en los depósitos de ACS de la instalación inicial, 8m<sup>3</sup>.

- $\rho_{agua}$  la densidad del agua a una temperatura intermedia, 992 kg/m<sup>3</sup>.

- $C_{p\ agua}$  el calor específico del agua a una temperatura intermedia, 4180 J/K·kg.

- $T_{suministro}$  la temperatura del agua de suministro, 60°C.

- $T_{agua\ red}$  la temperatura del agua de red en el caso más desfavorable, 8°C en Enero.

- $t$  el tiempo para llevar a cabo el aporte de energía, siendo razonable 1 horas.

En este caso, la potencia térmica que tiene que aportar la caldera sería:

$$P_{ACS} = \frac{8 \cdot 992 \cdot 4180 \cdot (60 - 8)}{1 \cdot 3600} \approx 480\ kW$$

Si a la caldera, a su vez le exigies cubrir la potencia térmica de la piscina, unos 70kW, además de la potencia térmica de calefacción, que puede estimarse en 100 kW, la potencia necesaria aumenta siendo:



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

$$P_{caldera} = P_{ACS} + P_{piscina} + P_{calefacción} \approx 650 \text{ kW}$$

Además de lo expuesto anteriormente, la demanda puede tener picos impredecibles, que justifiquen el poseer una caldera algo superior a la propuesta en un diseño conservativo, ya que económicamente no es un factor altamente determinante en una instalación de gran tamaño.

### 3.7 Cálculo del sistema de control

Como anteriormente se mencionó, el sistema que se va a llevar a cabo para regular la instalación será el control de temperaturas a la entrada y salida de los captadores, de manera que:

-Si la diferencia entre temperatura de entrada y salida es mayor o igual a 6°C, el sistema se pone en marcha.

-Cuando se detecte que el valor de esa diferencia de temperaturas es menor o igual a 2°C, entonces se detienen las bombas.

-Si la temperatura de salida es mayor que la entrada, el sistema funciona correctamente

Además, si la temperatura es excesiva, mayor o igual a 90°C, se activará la unidad de disipación de calor. Si la temperatura a la salida es menor que ese valor, los ventiladores permanecen apagados.

Este sistema de control del circuito primario y secundario se utilizará también en la parte perteneciente a la piscina, exceptuando el sistema de disipación.

Es indispensable también un sensor antes del intercambiador del circuito auxiliar, que determine si la temperatura del agua proveniente del almacenamiento solar es suficientemente alta. En este caso, si es inferior a 60°C, el circuito de agua auxiliar conectado a la caldera, ha de intercambiar calor hasta suplir el déficit de temperatura.

Aparte de lo anteriormente mencionado, no se llevará a cabo ninguna selección ni diseño de grupo de control, pero se entiende que sin el mismo no se puede llevar a cabo la correcta regulación de todos los sistemas presentes.

## 4 Cálculo de componentes de la instalación de la piscina

### 4.1 Cálculo del sistema de captación

Al igual que sucedía en la instalación de ACS, el fluido calo portado ha de ser una mezcla de agua y anticongelante que sea capaz de resistir las posibles heladas de la temporada de invierno. Por lo tanto, los cálculos realizados anteriormente son perfectamente aplicables en este caso, siendo el fluido que circula por los captadores igual en ambos sistemas.

#### 4.1.1 Cálculo del área de captadores

En este caso se trata de cubrir la demanda de agua caliente para climatizar la piscina cubierta, luego las exigencias de CTE son diferentes. Al ser zona climática IV, la fracción que ha de atenderse mediante la planta solar es igual al 60%

	Zona climática				
	I	II	III	IV	V
Piscinas cubiertas	30	30	50	60	70

**Ilustración 68 Contribución solar mínima para piscinas cubiertas según zona climática. Referencia [6]**

De igual forma, no podrá superarse el 110% de contribución solar en el mismo mes, ni tres meses seguidos cubriendo más del 100% de la demanda.

Los datos requeridos por el Programa de Mathcad para dimensionar el área de captadores y la fracción solar cubierta en la climatización de la piscina, son diferentes a los necesarios para la instalación ACS. Como se explica en el anexo 9.1.2, el programa de la piscina se basa en el anterior, introduciendo ciertas modificaciones. Por lo tanto los datos de entrada también cambian.

Para diseñar la instalación son necesarios los datos que se adjuntan en la siguiente tabla, la cual fue obtenida a partir de los apuntes de la asignatura Instalaciones de Energías Renovables, de la web <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=es&map=europe> y los datos proporcionados por la empresa responsable del mantenimiento del polideportivo.

	Irradiación Total diaria media mensual en Leganés $\left[ \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot día} \right]$	Irradiación Difusa diaria media mensual en Leganés $\left[ \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot día} \right]$	Tª media mensual diurna [°C]	Tª agua de red [°C]	Caudales medios mensuales de recirculación del agua de piscina [m³/día]	Caudales medios de agua de renovación [m³/día]
<b>Enero</b>	2083	885	6,2	8	180,7	6,71
<b>Febrero</b>	2921	1255	7,4	8	191,6	6,21
<b>Marzo</b>	4366	1624	9,9	10	199,2	6,55
<b>Abril</b>	5543	2031	12,2	12	181,6	6,9
<b>Mayo</b>	6449	2183	16	14	197,2	6,87
<b>Junio</b>	7371	2036	20,7	17	201,8	7,13
<b>Julio</b>	7801	1599	24,4	20	189,4	4,42
<b>Agosto</b>	6757	1602	23,9	19	198,8	19,9
<b>Septiembre</b>	5185	1573	20,5	17	189,8	6,33
<b>Octubre</b>	3269	1354	14,7	13	193,2	6,71
<b>Noviembre</b>	2273	989	9,4	10	193,1	6,93
<b>Diciembre</b>	1802	798	6,4	8	191	5,97

**Tabla 30 Datos introducidos en el programa Mathcad para dimensionar piscina**



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

### Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

Al igual que antes, los datos introducidos hacen referencia a la media para un día tipo de cada mes. A partir del comportamiento en un día, se estima la actuación durante el mes y con ello durante todo el año.

Cada columna de la tabla será asignada a una variable dentro del programa.

Además se tiene que introducir las coordenadas geográficas, igual que se hizo para dimensionar en el programa ACS.

Por simplicidad, se decide usar el mismo tipo de colectores que se había empleado para el ACS. Es cierto que podrían utilizarse captadores no vidriados, ya que las temperaturas de trabajo son inferiores en este caso, pero se decide continuar con los mismos, que además trabajarán con mucho mejor rendimiento.

El ángulo de inclinación óptimo es exactamente el mismo que para la instalación ACS, siendo válida la justificación anteriormente descrita.

El único parámetro que se cambiará, aparte del área total de colectores, es el caudal circulante por los mismos. Se disminuye el caudal circulante a 60 l/h por unidad de captación, reduciendo con ello las pérdidas por desgaste y las necesidades de bombeo de la instalación.

Finalmente los datos de la instalación se adjuntan la siguiente tabla:

$\beta$ [°]	$\gamma$ [°]	Número captadores	A [m <sup>2</sup> ]	m [l/h]	$\eta_{\text{medio}}$	$f_{\text{anual}}$
45	0	70	162,47	60	0,582	0,621

**Tabla 31 Configuración final de captadores ACS**

Comentar que la fracción que se cubre es superior a la requerida por normativa, incluso sin llegar a obtener excedentes de producción en ningún mes del año, por lo que sería factible una reducción del área de captación. Sin embargo, para llevar a cabo una distribución uniforme de los captadores, en grupos con el mismo número de unidades y las mismas baterías por fila, es indispensable dotar a la instalación de 70 captadores.

Al igual que en el capítulo anterior, es interesante comparar las tablas 72 y 74 del anexo 9.1.2, dónde se muestra mensualmente, la potencia térmica cubierta mediante energía solar y la potencia térmica demandada, respectivamente.

#### 4.1.2 Cálculo de pérdidas de radiación solar

Al estar situados los captadores con la misma inclinación y sobre el mismo tejado, las pérdidas sufridas por los colectores serán idénticas a las de la instalación ACS, las cuales fueron descritas previamente.

#### 4.1.3 Cálculo de la distribución de los captadores en el tejado y la distancia mínima entre filas

La superficie disponible es la dejada por la instalación ACS. Ésta ocupaba prácticamente la mitad del tejado, luego la otra mitad se destinará a los colectores para la piscina.



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

La separación con respecto la última fila de los captadores de ACS será la anteriormente calculada, 4,46 m.

En este caso el número total de captadores, 70, se agrupan en 10 subgrupos de 7 en paralelo.

No existe ningún problema ya que el límite son 10, mientras que la recomendación del fabricante es entorno a 6.

El ancho de cada captador es de 1,056 metros, así que cada subgrupo de 6 tendrá una longitud igual a siete veces esa cantidad más una pequeña separación entre unidades. Suponiendo esa distancia de unos 20 centímetros:

$$L_{subgrupo} = 1.056 \cdot 7 + 1,2 = 8.59 \text{ m}$$

Teniendo en cuenta que la longitud de la fachada son 62 metros y suponiendo un espacio aproximado de medio metro entre subgrupos, entrarían hasta 6 subgrupos. En este caso, se harán dos filas de 5 subgrupos cada una.

Como se mencionó anteriormente, el espacio disponible para los captadores de la piscina era de 3 filas, luego no hay problemas para situar las dos filas restantes, que se situaran a continuación de la última de ACS.

### 4.2 Cálculo del sistema de acumulación

En este caso, es el propio vaso de compensación de la piscina el que actúa de almacenamiento, luego no hay que dimensionar ningún acumulador. El volumen de éste es aproximadamente la quinta parte de la piscina, unos 100 m<sup>3</sup>.

### 4.3 Cálculo del sistema de intercambio

Para dimensionar los dos intercambiadores necesarios en la instalación de la piscina se van a utilizar otros modelos diferentes de intercambiadores comerciales, para los cuales se calculará el número idóneo de placas. De igual forma que para la instalación ACS, se usará el programa de dimensionamiento de intercambiadores, incluido en el anexo 9.1.3.

El primero es el que se encarga del intercambio entre circuito primario y secundario, y el otro es el encargado de recuperar parte de la energía del agua que se desecha cada día.

Para el primero, se elige el modelo M3 del mismo fabricante que el de la instalación ACS.

Fabricante	Modelo	Tipo de placa	Altura [mm]	Anchura [mm]	Espesor [mm]	conductividad [W/m·K]
Alfa Laval	M3	H	357	92	0.5	13.4

Tabla 32 Datos del intercambiador entre circuito primario y secundario para piscina

Finalmente, los datos relevantes obtenidos tras el diseño se resumen en la siguiente tabla:

Potencia Intercambio [W]	Número de placas	Separación entre placas [mm]	Pérdida de Carga primario [Pa]	Pérdida de carga secundario [Pa]
55920	29	2	10400	10060

**Tabla 33 Resultados del intercambiador entre circuito primario y secundario de la piscina**

Las pérdidas de carga tanto en circuito primario como secundario son inferiores al límite de 3 m.c.a.

En cuanto al intercambiador recuperador de calor del agua desechada:

Se diseña para cumplir las condiciones del mes de Agosto, que es cuando mayor potencia a intercambiar entre ambos flujos de agua se tiene.

El intercambiador en este caso se seleccionará a partir de otro modelo del mismo fabricante pero más pequeño, ya que la potencia a transmitir es muy inferior.

Fabricante	Modelo	Tipo de placa	Altura [mm]	Anchura [mm]	Espesor [mm]	conductividad [W/m·K]
Alfa Laval	T2B	H	298	70	0.5	13.4

**Tabla 34 Datos del intercambiador entre agua de entrada y desechada de la piscina**

Potencia Intercambio [W]	Número de placas	Separación entre placas [mm]	Pérdida de Carga del agua de desagüe [Pa]	Pérdida de carga del agua de red [Pa]
4090	5	2	1574	3219

**Tabla 35 Resultados del intercambiador entre agua de entrada y desechada de la piscina**

Todas las características técnicas se detallan en el anexo 9.2.2.

### 4.4 Cálculo del sistema hidráulico

De la misma forma que para el circuito ACS, se procede al cálculo del sistema hidráulico de la instalación para la piscina.

Las dimensiones de los diámetros del sistema de tuberías son normalizadas y se han diseñado para cumplir la exigencia de tener menos de 40 mm.c.a de pérdida de carga por metro de tubería.

### 4.4.1 Descripción del sistema de tuberías

Se deberá diseñar lo más corto posible, con el fin de evitar pérdidas térmicas y de presión a lo largo de los conductos.

#### 4.4.1.1 Circuito primario

Discurre una pequeña parte por la sala de máquinas y la gran mayoría por el exterior del edificio.

La distribución de los colectores destinados a calentar el agua de la piscina se puede observar en la ilustración número 64 del capítulo anterior.

En este caso la distribución del fluido a través del circuito primario de la piscina sigue este orden:

El fluido es impulsado por la bomba desde la sala de máquinas, y sube en dirección vertical por una tubería de distribución hasta el tejado, que tiene un desnivel de unos 20 metros. En el tejado, se hasta una de las dos líneas en paralelo, compuestas por 5 baterías de 7 colectores también unidos en paralelo entre sí. Para asegurar que el circuito está equilibrado, las tuberías se disponen con retorno invertido. Después, a través de otra tubería de distribución retorna hasta el intercambiador de calor situado en la sala de máquinas.

Teniendo en cuenta el caudal de fluido que circula en cada caso, se divide el circuito principal en 4 tramos diferentes:

Cada una de las dos líneas es un tramo distinto, las tuberías desde el intercambiador hasta el tejado forman otro tramo, al igual que las tuberías desde el tejado que retornan al intercambiador.

Los tramos con sus longitudes, diámetros, caudales y diferencias de cota se pueden ver en la siguiente tabla resumen:

Tramo	Diámetro [mm]	Caudal [m³/h]	Longitud [m]	$\Delta H$ [m]
1	42	4,190	57	22
2	35	2,095	133,5	1,7
3	35	2,095	147,5	1.7
4	42	4,190	57	22

Tabla 36 Características de los tramos de tubería del circuito primario para la piscina

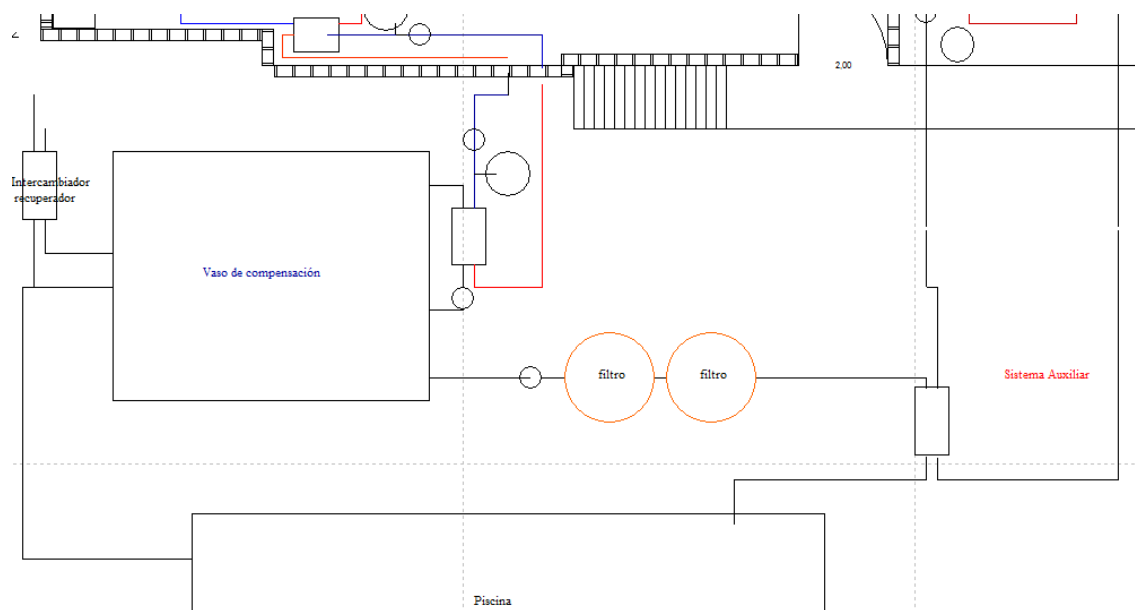
Para el circuito se han de añadir los siguientes elementos:

Tramo	Diámetro [mm]	Válvulas de esfera	Codos 90°	Uniones T	Válvula Anti retorno
1	42	2	4	0	1
2	35	12	4	12	0
3	35	12	4	12	0
4	42	2	4	0	0

Tabla 37 Elementos del circuito primario para la piscina

### 4.4.1.2 Circuito secundario

Se encuentra íntegramente en la sala de máquinas, de la cual se añade una ilustración con el circuito secundario simplificado.



**Ilustración 69 Esquema de la sala de máquinas, parte de la piscina**

La distribución del fluido a través del circuito secundario en la piscina tiene solo un tramo:

El agua sale del vaso de expansión hacia el intercambiador de calor, y retorna al vaso más caliente.

De la distribución del agua de recirculación en la piscina se encarga otra bomba, que hace circular el fluido desde el vaso, atravesando los filtros y el sistema auxiliar hasta el vaso de la piscina. De allí, el agua que desborda y la recirculada vuelven al vaso. Parte del agua que será desechada intercambia calor con el agua de entrada de red antes de tirarse.

Por lo tanto el único tramo que se tiene que dimensionar, teniendo en cuenta el caudal es el siguiente:

Tramo	Diámetro [mm]	Caudal [m <sup>3</sup> /h]	Longitud [m]	$\Delta H$ [m]
1	42	4,297	6	1

**Tabla 38 Características del tramo de tubería del circuito secundario de la piscina**

Los elementos auxiliares que se añaden están recogidos en la siguiente tabla:

Tramo	Diámetro [mm]	Válvulas de esfera	Codos 90°	Entrada	Salida	Válvula Anti retorno
1	42	2	4	1	1	1

**Tabla 39 Elementos del circuito secundario de la piscina**

### 4.4.2 Aislamiento

El aislamiento de las tuberías se hará con los mismos espesores que se determinaron para la instalación ACS.

Los metros totales de aislante para interior y exterior, tanto en circuito primario como secundario, con sus respectivos espesores de aislante se clasifican en la siguiente tabla:

Circuito	Disposición	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Espesor [mm]
primario	Interior	42	16	30
primario	Exterior	42	98	40
primario	Exterior	35	281	40
secundario	Interior	42	6	30

Tabla 40 Espesores y longitudes de aislante para la piscina

### 4.4.3 Cálculo de bombas de circulación

Al igual que sucedía en la instalación ACS, el circuito primario en este caso también ha de contar con dos bombas en paralelo.

#### 4.4.3.1 Cálculo de pérdidas de carga en tuberías

Haciendo uso de la hoja de cálculo de Mathcad de pérdidas de carga en tuberías, incluida en el anexo 9.1.4, se obtienen los resultados para la instalación de la piscina.

Por lo tanto aquí simplemente se va a resumir los datos obtenidos para cada tramo y los totales:

Para el circuito primario, al estar situados los captadores y las líneas de baterías de captadores en paralelo, sólo es necesario ver las pérdidas de carga por el recorrido más desfavorable. Éste, es el formado por el tramo 1, 3 y 4.

Tramo	Velocidad [m/s]	Reynolds	f	Pérdidas Primarias [Pa]	Pérdidas Secundarias [Pa]	Total Pérdidas [Pa]
1	0,928	30940	0,0234	14590	2724	17314
3	0,682	18750	0,0263	20580	5252	25832
4	0,928	30940	0,0234	14590	1265	15855

Tabla 41 Pérdidas de carga en conductos del circuito primario de la piscina

El total de pérdidas es la suma de todos los tramos, en este caso:

$$\text{Pérdidas tuberías circuito primario} = \sum \text{Total pérdidas} = 59001 \text{ Pa}$$

Las pérdidas características del circuito secundario:

Tramo	Velocidad [m/s]	Reynolds	f	Pérdidas Primarias [Pa]	Pérdidas Secundarias [Pa]	Total Pérdidas [Pa]
1	0,950	54460,000	0,0206	1386	2328	3714

Tabla 42 Pérdidas de carga en conductos del circuito secundario en la piscina

$$\text{Pérdidas tuberías circuito secundario} = \sum \text{Total pérdidas} = 3714 \text{ Pa}$$

### 4.4.3.2 Cálculo de pérdidas de carga en intercambiadores

Según los programas de cálculo para intercambiadores, se obtienen las siguientes pérdidas:

Intercambiador Circuito primario-secundario Piscina	Perdida de carga [Pa]
Fluido caliente	10400
Fluido frío	10060

Tabla 43 Pérdidas de carga intercambiador primario-secundario de la piscina

### 4.4.3.3 Cálculo de pérdidas de carga en colectores

Al tratarse del mismo tipo de colector, conexionado igualmente en paralelo, la pérdida de carga se recalcula de igual forma que en el caso ACS, pero para el caudal de la instalación de la piscina.

Usando la gráfica de la ilustración numero 67, se obtiene una pérdida de carga de 80 mbar, que es equivalente a 8000 Pa.

Para dimensionar las bombas son necesarios dos datos, el caudal y la diferencia de altura a vencer.

La diferencia de altura será igual de la diferencia de cotas entre el punto más alto del circuito y el más bajo, sumado a la caída de presión expresada en términos de altura.

$$\Delta H_{bomba} = \Delta H_{cotas} + \Delta H_{pérdidas}$$

Para el circuito primario la suma de todas las pérdidas de carga es igual:

$$\text{Pérdidas primario} = \text{Pérdidas tuberías} + \text{pérdida intercambiador} + \text{Pérdida colector}$$

$$\text{Pérdidas primario} = 59001 + 10400 + 8000 = 77401 \text{ Pa}$$

Convirtiendo las pérdidas de Pascales a altura en metros:



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

$$\Delta H_{pérdidas} = \frac{P}{\rho \cdot g} = 7,78 \text{ m}$$

Siendo

- $\rho$  la densidad del fluido circulante, en este caso agua más propilenglicol.
- $g$  el valor de la aceleración de la gravedad,  $9.8 \text{ m/s}^2$

$$\Delta H_{bomba} = 23,7 + 7,78 = 31,48 \text{ m}$$

Se requerirá por tanto una bomba que impulse un caudal igual al del circuito primario,  $4.19 \text{ m}^3/\text{h}$  a una altura de  $31,5 \text{ m}$ .

Para el circuito secundario la suma de todas las pérdidas de carga es igual:

$$Pérdidas \text{ secundario} = Pérdidas \text{ tuberías} + pérdida \text{ intercambiador}$$

$$Pérdidas \text{ secundario} = 3714 + 10060 = 13774 \text{ Pa}$$

Convirtiendo las pérdidas de Pascales a altura en metros:

$$\Delta H_{pérdidas} = \frac{P}{\rho \cdot g} = 1,42 \text{ m}$$

Siendo

- $\rho$  la densidad del fluido circulante, en este caso agua.
- $g$  el valor de la aceleración de la gravedad,  $9.8 \text{ m/s}^2$ .

$$\Delta H_{bomba} = 1 + 1,42 = 2,42 \text{ m}$$

Se requerirá por tanto una bomba que impulse un caudal igual al del circuito secundario,  $4.29 \text{ m}^3/\text{h}$  a una altura de  $2,4 \text{ m}$ .

Para cubrir estas necesidades de bombeo se recurre a las bombas comerciales:

Para el circuito primario se usarán dos bombas en paralelo del modelo TP 32-380 del fabricante Grundfos. Para el circuito secundario se usarán dos bombas en paralelo del modelo TP 25-50 del mismo fabricante. Los datos quedan resumidos en la siguiente tabla:

Fabricante	Modelo	Cantidad	Altura bomba [m]	Caudal bomba [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	Rendimiento	Potencia Consumida [kW]
Grundfos	TP 32-380	2	31,5	4,19	37%	1,5
Grundfos	TP 40-180	2	2,42	4,29	55%	0,08

Tabla 44 de las bombas del circuito primario y secundario de la piscina





## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

Las curvas de las bombas referentes a estos modelos se adjuntan en el anexo 9.2.6.

### 4.4.4 Cálculo del vaso de expansión

Se siguen los mismos pasos que para el circuito de ACS.

La ecuación que define en volumen será:

$$V_t = V \cdot C_e \cdot C_p$$

Donde

- $V_t$  es el volumen total del vaso.
- $V$  el volumen inicial de fluido en el circuito.
- $C_e$  es el coeficiente de expansión.
- $C_p$  es el coeficiente de presión.

$V$  se calcula sumando todos los volúmenes de líquido calo portador del circuito primario, siendo el resultado:

$$V = V_{\text{captadores}} + V_{\text{tuberías}} \cdot V_{\text{intercambiador}}$$

El volumen de captadores,  $V_{\text{captadores}}$  es la suma de los litros contenidos en todos los captadores del circuito.

El fabricante indica que por captador el volumen de fluido contenido es igual a 1.83 l

Luego, con un número total de captadores igual a 70, se obtiene:

$$V_{\text{captadores}} = 1.83 \cdot N_{\text{captadores}} = 1.83 \cdot 70 = 128,1 \text{ l}$$

El volumen de fluido en las tuberías dependerá del diámetro interior de las mismas y de su longitud. Atendiendo al esquema de la distribución de las mismas se tiene:

Longitud total D=42mm	Longitud total D=35mm
114 m	281 m

**Tabla 45 Longitudes totales de tuberías en el circuito primario de la piscina**

Con lo que el volumen total de líquido contenido en la red de tuberías será igual a:

$$V_{\text{tuberías}} = \frac{\pi \cdot [(D)_{\text{interior } 42}]^2}{4} \cdot L_{\text{total } 42} + \frac{\pi \cdot [(D)_{\text{interior } 35}]^2}{4} \cdot L_{\text{total } 35}$$



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

Siendo

-  $D_{\text{interior}}$  los diámetros interiores correspondientes para las tuberías de 42 mm y 35mm, en metros.

-  $L_{\text{total}}$  las longitudes totales de todos los tramos de tuberías para cada diámetro, en metros.

$$V_{\text{tuberías}} = \frac{\pi \cdot (0,04)^2}{4} \cdot 114 + \frac{\pi \cdot (0,033)^2}{4} \cdot 281 = 0,1432 + 0,2403 = 0,38359 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{tuberías}} = 0,38359 \text{ m}^3 = 383,59 \text{ l}$$

El volumen de fluido en el intercambiador será muy pequeño en comparación con el resto de la instalación, aun así se calcula de la siguiente forma:

$$V_{\text{intercambiador}} = V_{\text{entre placas}} \cdot \frac{N_{\text{canales}}}{2}$$

Siendo

-  $V_{\text{entre placas}}$  el volumen que hay entre dos placas, por las que circulará el fluido. Dependerá de la anchura, longitud y separación entre placas.

-  $N_{\text{canales}}$  es el número total de canales por los que circulan los fluidos que intercambian calor.

$$V_{\text{intercambiador}} = 0,066 \text{ l} \cdot \frac{28}{2} = 0,924 \text{ l}$$

El volumen total del fluido de la instalación será:

$$V = 128,1 + 383,59 + 0,924 = 512,62 \text{ l}$$

Dado que el fluido calo portado es el mismo, el coeficiente de expansión toma el mismo valor

$$C_e = C_{e \text{ agua}} \cdot f_c = 0,04032 \cdot 1,58344 = 0,06384$$

Al no variar excesivamente la diferencia de cotas entre el circuito de ACS y el de la piscina, se puede tomar el valor antes calculado de coeficiente de presión como válido.

$$C_p = 2,75$$

Por lo que el volumen total del vaso de expansión será:

$$V_t = V \cdot C_e \cdot C_p = 512,62 \cdot 0,06384 \cdot 2,75 = 89,99 \text{ l}$$

Según el CTE el sistema de expansión debe ser tal que sea capaz de absorber la expansión del fluido contenido en tuberías y captadores multiplicado por 1.1, luego el volumen total será:

$$V_t = 1,1 \cdot 89,99l = 98,99 l$$

Los vasos de expansión destinan la mitad del vaso a volumen de agua y la otra mitad al aire que compensa las diferencias de presión, luego el depósito que cumple los requisitos debe ser mayor o igual a 198 l. En un catálogo comercial, se selecciona el modelo 220 AMR del fabricante Salvador Escoda. Los datos relevantes del vaso se resumen en la siguiente tabla, y los demás datos técnicos se adjuntan en el anexo 9.2.5:

Fabricante	Modelo	Volumen	Altura [mm]	Diámetro [mm]
Salvador Escoda	220 AMR	220 l	1405	485

**Tabla 46 Datos del vaso de expansión circuito de piscina**

Debido al gran volumen almacenado en el vaso de compensación, tampoco es necesario un vaso de expansión en el circuito secundario. El mismo contenedor del agua no está lleno completamente, de manera que puede subir o bajar el nivel en función el volumen del agua.

#### 4.5 Cálculo del sistema auxiliar

El sistema auxiliar es el descrito para la instalación de ACS.

#### 4.6 Cálculo del sistema de control

Como se mencionó anteriormente, el control de las bombas de los circuitos primario y secundario se realizará igual que para la instalación ACS.

Además, es indispensable un control de temperatura antes del intercambiador del sistema auxiliar. La temperatura a la que empieza a funcionar, en este caso no es constante, pero el objetivo a conseguir está siempre entrono a 35°C.

Aparte del control necesario para mantener la piscina con las demandas energéticas cubiertas, será necesario un control de la calidad del agua de la misma, que determine finalmente los caudales de recirculación y renovación diariamente. Por lo tanto ambos controles deben ser simultaneos, adaptando las necesidades energéticas a las exigencias higiénicas.

Tampoco se llevará a cabo ningún dimensionamiento ni elección de modelo comercial para esta instalación, dejando claro que sin la pertinente regulación es imposible el correcto funcionamiento de la misma.

## 5 Análisis ambiental

En este capítulo se pretende estimar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero que supone la instalación de ACS y piscina.

### 5.1 Análisis de la instalación de ACS

	Potencia de colectores [kW]	Días al mes	Horas medias de sol útiles diarias [h/día]	Energía obtenida [kW·h]
Enero	45,262	31	9,439	13244,07
Febrero	52,313	28	10,417	15258,45
Marzo	54,407	31	11,703	19738,48
Abril	53,527	30	11,897	19104,32
Mayo	55,073	31	11,786	20121,80
Junio	56,054	30	11,731	19727,08
Julio	47,608	31	11,755	17348,59
Agosto	-	-	-	-
Septiembre	53,913	30	11,976	19369,86
Octubre	51,116	31	10,878	17237,24
Noviembre	48,958	30	9,714	14267,34
Diciembre	41,565	31	9,133	11768,01
<b>Total año</b>				<b>187185,24</b>

Tabla 47 Potencia térmica suministrada por la instalación ACS durante un año

Aclarar que el valor de horas útiles de sol diarias es inferior al número de horas de luz entre la salida y puesta del sol en un día, ya que sólo se tienen en consideración aquellas horas en las que el valor de la radiación solar es suficientemente elevado como para poner en funcionamiento la instalación.

La fuente de energía es el gas natural, siendo el rendimiento de la caldera de 93,2%.

Según el RITE I.T.2 Exigencias de eficiencia energética, el valor de emisiones de CO<sub>2</sub> para el gas natural es  $204 \frac{g}{kW \cdot h}$

Por lo tanto, si esta energía es producida en caldera en vez de por colectores solares, generan una emisión igual a:

$$\frac{\text{Emisión } CO_2}{\text{anual}} = \frac{\text{Energía neta total}}{\eta_{\text{caldera}}} \cdot \text{Emisión gas natural} \frac{g}{kW \cdot h}$$

$$\frac{\text{Emisión } CO_2}{\text{anual}} = \frac{187185,24 \text{ kW} \cdot h}{0.932} \cdot 204 \frac{g}{kW \cdot h} = 40971,8 \text{ kg de } CO_2 \text{ al año}$$

Suponiendo una vida útil de la instalación de 25 años:

$$\frac{\text{Emisión } CO_2}{\text{vida útil}} = \frac{\text{Emisión } CO_2}{\text{anual}} \cdot 25 \text{ años} = 1024,3 \text{ t de } CO_2 \text{ durante la vida útil}$$

## 5.2 Análisis de la instalación de la piscina

	Potencia de colectores [kW]	Días al mes	Horas medias de sol útiles diarias [h/día]	Energía obtenida [kW·h]
<b>Enero</b>	32,640	31	9,439	9550,76
<b>Febrero</b>	35,400	28	10,417	10325,33
<b>Marzo</b>	40,660	31	11,703	14751,16
<b>Abril</b>	41,190	30	11,897	14701,12
<b>Mayo</b>	43,410	31	11,786	15860,54
<b>Junio</b>	48,900	30	11,731	17209,38
<b>Julio</b>	55,190	31	11,755	20111,51
<b>Agosto</b>	55,930	31	11,849	20544,15
<b>Septiembre</b>	50,370	30	11,976	18096,93
<b>Octubre</b>	39,330	31	10,878	13262,78
<b>Noviembre</b>	34,490	30	9,714	10051,08
<b>Diciembre</b>	30,120	31	9,133	8527,66
<b>Total año</b>				172992,41

Tabla 48 Potencia térmica suministrada por la instalación de la piscina durante un año

Siendo la misma fuente de energía primaria y la misma caldera, se usan los datos anteriores también en este caso.

Por lo tanto, si esta energía es producida en caldera en vez de por colectores solares, generan una emisión igual:

$$\frac{\text{Emisión } CO_2}{\text{anual}} = \frac{\text{Energía neta total}}{\eta_{\text{caldera}}} \cdot \text{Emisión gas natural} \frac{g}{kW \cdot h}$$

$$\frac{\text{Emisión } CO_2}{\text{anual}} = \frac{172992,41 \text{ kW} \cdot h}{0,932} \cdot 204 \frac{g}{kW \cdot h} = 37865,3 \text{ kg de } CO_2 \text{ al año}$$

Suponiendo una vida útil de la instalación de 25 años:

$$\frac{\text{Emisión } CO_2}{\text{vida útil}} = \frac{\text{Emisión } CO_2}{\text{anual}} \cdot 25 \text{ años} = 946,6 \text{ t de } CO_2 \text{ durante la vida útil}$$

Dentro de la instalación de la piscina, se cuenta con el intercambiador de calor recuperador, que se encarga de aprovechar el calor del agua de desborde de la piscina para calentar el agua de red que entra al vaso de compensación.

Suponiendo un uso del mismo durante las 24 horas del día, ya que es aprovechado tanto con el sistema auxiliar como con la instalación solar, y elaborando una tabla como la anterior se obtiene:

	Potencia intercambiador [kW]	Días al mes	Horas medias de sol útiles diarias [h/día]	Energía obtenida [kW·h]
<b>Enero</b>	2,284	31	24	1699,30
<b>Febrero</b>	2,036	28	24	1368,19
<b>Marzo</b>	1,990	31	24	1480,56
<b>Abril</b>	1,914	30	24	1378,08
<b>Mayo</b>	1,672	31	24	1243,97
<b>Junio</b>	1,398	30	24	1006,56
<b>Julio</b>	0,476	31	24	354,25
<b>Agosto</b>	4,090	31	24	3042,96
<b>Septiembre</b>	1,176	30	24	846,72
<b>Octubre</b>	1,727	31	24	1284,89
<b>Noviembre</b>	2,160	30	24	1555,20
<b>Diciembre</b>	1,917	31	24	1426,25
<b>Total año</b>				16686,92

Tabla 49 Potencia térmica ahorrada en el intercambiador durante el año

Usando la misma fuente de energía primaria y la misma caldera para aportar la energía que ahorra el intercambiador, se tiene

$$\frac{\text{Emisión co2}}{\text{anual}} = \frac{\text{Energía neta total}}{\eta_{\text{caldera}}} \cdot \text{Emisión gas natural} \frac{g}{kW \cdot h}$$

$$\frac{\text{Emisión co2}}{\text{anual}} = \frac{16686,92 kW \cdot h}{0,932} \cdot 204 \frac{g}{kW \cdot h} = 3652,5 \text{ kg de CO2 al año}$$

Suponiendo una vida útil de la instalación de 25 años:

$$\frac{\text{Emisión co2}}{\text{vida útil}} = \frac{\text{Emisión co2}}{\text{anual}} \cdot 25 \text{ años} = 91,31 \text{ t de CO2 durante la vida útil}$$

El ahorro total de emisiones logrado por la instalación de la piscina será:

$$\frac{\text{Emisión co2 total Piscina}}{\text{anual}} = \frac{\text{Emisión co2 Piscina}}{\text{anual}} + \frac{\text{Emisión co2 intercambiador}}{\text{anual}}$$

$$\frac{\text{Emisión co2 total Piscina}}{\text{anual}} = 37865,3 + 3652,5 = 41517,8 \text{ kg de CO2 al año}$$

Por lo tanto, durante la vida útil:

$$\frac{\text{Emisión co2}}{\text{vida útil}} = \frac{\text{Emisión co2}}{\text{anual}} \cdot 25 \text{ años} = 1037,95 \text{ t de CO2 durante la vida útil}$$



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

### 5.3 Ahorro global de emisiones de la instalación

$$\frac{\text{Emisión co2}}{\text{vida útil}} = \left( \frac{\text{Emisión co2 ACS}}{\text{anual}} + \frac{\text{Emisión co2 total Piscina}}{\text{anual}} \right) \cdot 25 \text{ años}$$

$$\frac{\text{Emisión co2}}{\text{vida útil}} = (40971,8 + 41517,8) \cdot 25 \text{ años} = 2062,24 \text{ t de CO2 durante vida útil}$$

Como se puede ambas instalaciones suponen un ahorro en toneladas de CO2 muy similar. Esto es debido a que la parte de ACS no tienen en cuenta ningún ahorro en Agosto, mientras que la instalación de la piscina además ahorra energía con el intercambiador, de manera que al final ambos datos son muy similares a pesar de la diferencia de área de colectores entre las dos instalaciones.

## 6 Análisis económico

En este capítulo se hace un estudio económico de la rentabilidad de la instalación global, es decir, la suma de ambas instalaciones. No obstante, los presupuestos se presentan por separado.

### 6.1 Presupuesto de la instalación ACS

El desglose de todos los costes directos de los elementos viene en las siguientes tablas:

Sistema de captación			
Concepto	Cantidad	Precio unitario [€/ud]	Importe [€]
Colector solar Vitosol 200-F	126	890	112.140,00 €
Anticongelante Tyfocor L 200 l	2	970	1.940,00 €
Total			114.080,00 €

Tabla 50 Presupuesto del sistema de captación ACS

Sistema de acumulación			
Concepto	Cantidad	Precio unitario [€/ud]	Importe [€]
Depósito MVV3500RB	4	5106	20.424,00 €
Forro aislante Master 3500	4	350	1.400,00 €
Total			21.824,00 €

Tabla 51 Presupuesto del sistema de acumulación ACS

Sistema de intercambio			
Concepto	Cantidad	Precio unitario [€/ud]	Importe [€]
Intercambiador TB5	1	938	938,00 €
Placas Intercambiador TB5	27	36	972,00 €
Total			1.910,00 €

Tabla 52 Presupuesto del sistema de intercambio ACS

Sistema de disipación			
Concepto	Cantidad	Precio unitario [€/ud]	Importe [€]
Disipador DB 144	1	3514	3.514,00 €
Total			3.514,00 €

Tabla 53 Presupuesto del sistema de disipación ACS



Sistema hidráulico			
Concepto	Cantidad	Precio unitario [€/ud]	Importe [€]
Tubería cobre 54x1,2	67	27,26	1.826,42 €
Tubería cobre 40x1	463	16,98	7.861,74 €
Aislamiento coquilla 30mm tubería 54	59	9,53	562,27 €
Aislamiento coquilla 40mm tubería 54	53	11,35	601,55 €
Aislamiento coquilla 40mm tubería 42	463	9,2	4.259,60 €
Válvula esfera R250D 54	18	25,15	452,70 €
Válvula esfera R250D 42	48	20,15	967,20 €
Válvula anti retorno 54	1	50,6	50,60 €
Codo 90 tubería 54	24	26,51	636,24 €
Codo 90 tubería 42	12	14,69	176,28 €
Unión T tubería 42	15	14,81	222,15 €
Bomba TP 40-360	2	2819,9	5.639,80 €
Bomba TP 40-180	2	1780,2	3.560,40 €
Vaso expansión 500AMR	1	978	978,00 €
<b>Total</b>			<b>27.794,95 €</b>

Tabla 54 Presupuesto del sistema hidráulico ACS

<b>Presupuesto Total ACS</b>	<b>169.122,95 €</b>
------------------------------	---------------------

## 6.2 Presupuesto de la instalación de la piscina

El desglose de todos los costes directos de los elementos viene en las siguientes tablas:

Sistema de captación			
Concepto	Cantidad	Precio unitario [€/ud]	Importe [€]
Colector solar Vitosol 200-F	70	890	62.300,00 €
Anticongelante Tyfocor L 200 l	1	970	970,00 €
<b>Total</b>			<b>63.270,00 €</b>

Tabla 55 Presupuesto del sistema de captación Piscina

Sistema de intercambio			
Concepto	Cantidad	Precio unitario [€/ud]	Importe [€]
Intercambiador M3	1	474	474,00 €
Placas Intercambiador M3	29	20	580,00 €
Intercambiador T2B	1	423	423,00 €
Placas Intercambiador T2B	5	14	70,00 €
<b>Total</b>			<b>1.547,00 €</b>

Tabla 56 Presupuesto del sistema de intercambio Piscina

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

Sistema hidráulico			
Concepto	Cantidad	Precio unitario [€/ud]	Importe [€]
Tubería cobre 35x1	114	11,37	1.296,18 €
Tubería cobre 40x1	281	16,98	4.771,38 €
Aislamiento coquilla 30mm tubería 42	22	7,66	168,52 €
Aislamiento coquilla 40mm tubería 35	281	6,54	1.837,74 €
Aislamiento coquilla 40mm tubería 42	98	9,2	901,60 €
Válvula esfera R250D 35	24	18,6	446,40 €
Válvula esfera R250D 42	6	20,15	120,90 €
Válvula anti retorno 42	1	40,9	40,90 €
Codo 90 35	8	10,5	84,00 €
Codo 90 42	12	14,69	176,28 €
Unión T 35	24	10,96	263,04 €
Bomba TP 32-380	2	2396,7	4.793,40 €
Bomba TP 25-50	2	585,2	1.170,40 €
Vaso expansión 220AMR	1	547	547,00 €
<b>Total</b>			<b>16.617,74 €</b>

Tabla 57 Presupuesto del sistema hidráulico Piscina

<b>Presupuesto Total Piscina</b>	<b>82.434,74 €</b>
----------------------------------	--------------------

En ambos casos se tiene que sumar costes añadidos que no se recogen en el presupuesto, y que se estiman como porcentaje del total.

Concepto	Porcentaje del total	coste
Ingeniería	1,5%	3.773,37 €
Montaje e instalación	5%	12.577,88 €
Margen	2%	5.031,15 €
<b>Total</b>		<b>21.382,40 €</b>

Tabla 58 Costes indirectos de la instalación

Coste final de la instalación:

<b>Instalación ACS</b>	<b>169.122,95 €</b>
<b>Instalación de la piscina</b>	<b>82.434,74 €</b>
<b>Costes indirectos</b>	<b>20.929,60 €</b>
<b>IVA 18%</b>	<b>49.129,22 €</b>
<b>Total</b>	<b>322.069,31 €</b>

Tabla 59 Coste final de la instalación

El presupuesto total de la instalación asciende a *trescientos veintidós mil sesenta y nueve euros con treinta y un céntimos*.

En el presente proyecto no se ha contemplado la posibilidad de solicitar subvención a la inversión inicial, la cual reduciría un hipotético periodo de amortización, ya que se plantea en un escenario de crisis económica con posible reducción de subvenciones.

### 6.3 Viabilidad económica de la instalación

Para analizar la viabilidad económica de la instalación se usará la siguiente expresión simplificada del valor actual neto:

$$VAN = -C_0 + \sum_{m=1}^n VA_m \cdot \langle FC'_m \rangle$$

Siendo:

-VAN, valor actual neto, que nos indica el valor de la inversión a lo largo de los años. Cuando su valor es igual a 0, se igualan costes y beneficios.

- $C_0$  es la cantidad inicial de la inversión.

- $VA_m$  valor actual de un coste asumido en el año m.

- $FC'_m$  es el valor neto del flujo de caja para un año m.

Para el presente caso será la diferencia entre lo que se ahorra anualmente, considerado como entrada a caja, menos los gastos derivados de la explotación y mantenimiento de las instalaciones.

$$FC'_m = IN_m - C_m$$

Los valores de  $IN_m$  y  $C_m$  se calculan más adelante.

$$VA_m \cdot \langle FC'_m \rangle = IN_m \frac{(1+c)^m}{(1+i)^m} - C_m \frac{(1+I)^m}{(1+i)^m}$$

-i es el valor de la tasa de interés

-I es el valor de la inflación anual

-c es el porcentaje del aumento del coste del combustible

Se deben usar diferentes coeficientes porque el aumento del precio del combustible afecta directamente al ahorro anual, mientras que el aumento de la inflación afecta a los gastos de mantenimiento.

Por lo tanto, introduciendo los datos se obtendrá el año a partir del cual se amortiza

-I se sitúa en 1,4% en el mes de abril del año 2012, según datos del INE.

-i es tomado como referencia del Euribor +0.5%, siendo 1,368 en abril de 2012, valdrá 1.568%.

-c la empresa Iberdrola se compromete a realizar las subidas de coste de combustible a través del IPC anual.

Para calcular  $C_m$  se supondrá que es un 0,5% del total siendo igual a 1610,3€ al año



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

La cantidad de kW·h ahorrados se calculó en el apartado de análisis medioambiental. Como la instalación gasta más de 50000 kW·h al año, no dispone de tarifa de último recurso y se estimará la que empresa que gestiona el suministro de combustible es Iberdrola.

Para consumos por encima de 100000 kW·h anuales aplica las siguientes tarifas a fecha de abril de 2012:

Término variable	Impuestos	Total
0.05004 €/kW·h	18%	0.0590472€/kW·h

El consumo total de kW·h ahorrado por la instalación de ACS y piscina es:

Piscina	Intercambiador	ACS	Total
172992,41 kW·h	16686,92 kW·h	187185,24 kW·h	376864,57 kW·h

Aplicando el rendimiento de caldera finalmente se obtienen 404361,13 kW·h

La cantidad de euros ahorrados asciende a 23876,39€ anualmente.

El valor del flujo de caja neto, en este caso al ser la subida de combustible igual a la del IPC anual, se puede obtener directamente restando del ahorro anual el gasto de mantenimiento:

$$\langle FC'_m \rangle = 23876,39 - 1610,3 = 22266,1 \text{ €}$$

Aplicando el criterio VAN con los índices previamente indicados se obtiene lo siguiente:

Año	VAN
1	-299.840,04 €
2	-277.647,54 €
3	-255.491,74 €
4	-233.372,60 €
5	-211.290,04 €
6	-189.244,00 €
7	-167.234,43 €
8	-145.261,27 €
9	-123.324,45 €
10	-101.423,92 €
11	-79.559,61 €
12	-57.731,47 €
13	-35.939,43 €
14	-14.183,43 €
15	7.536,57 €
16	29.220,66 €
17	50.868,87 €
18	72.481,28 €
19	94.057,93 €
20	115.598,90 €
21	137.104,24 €
22	158.574,01 €
23	180.008,27 €
24	201.407,07 €
25	222.770,47 €

Tabla 60 VAN estimado a lo largo de la vida útil

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

Para entender los datos y dar una visión global del cálculo se adjunta la siguiente gráfica:

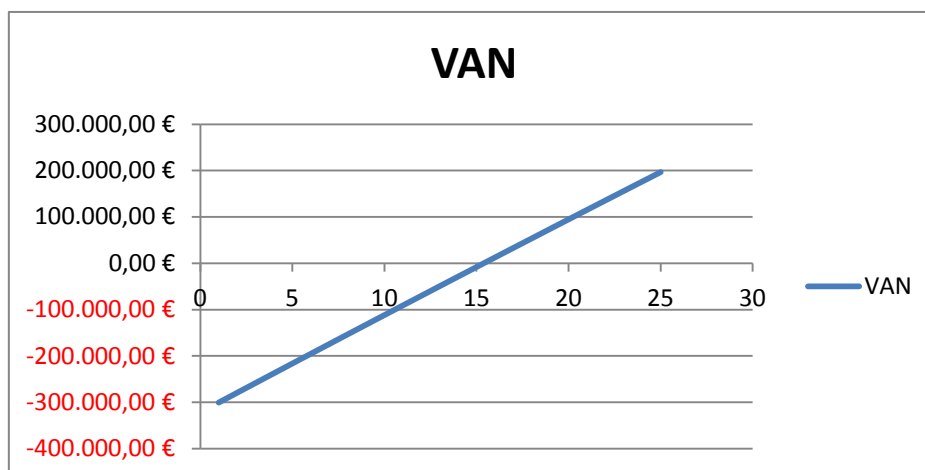


Ilustración 70 Gráfica de la evolución del VAN a lo largo de la vida útil

Como puede observarse, el periodo en el cual se estima el retorno de la inversión inicial es durante el año 14 al 15. Finalmente, se obtendría un beneficio económico estimado de casi 220.000€. A priori, la inversión parece más que justificada. No obstante, se van a proponer dos casos posibles más, para demostrar la fiabilidad de la inversión.

En el estudio anterior, el valor de la tasa de puede ser pequeño si la comparamos con los intereses que ofrecen los banco por depósitos a plazo fijo. Así que realizaremos el estudio doblando el valor del mismo. En este caso el interés ofrecido lo estimaremos en 3,15%, y seguiremos usando la misma tasa de inflación. Para este supuesto, la gráfica sería la siguiente:

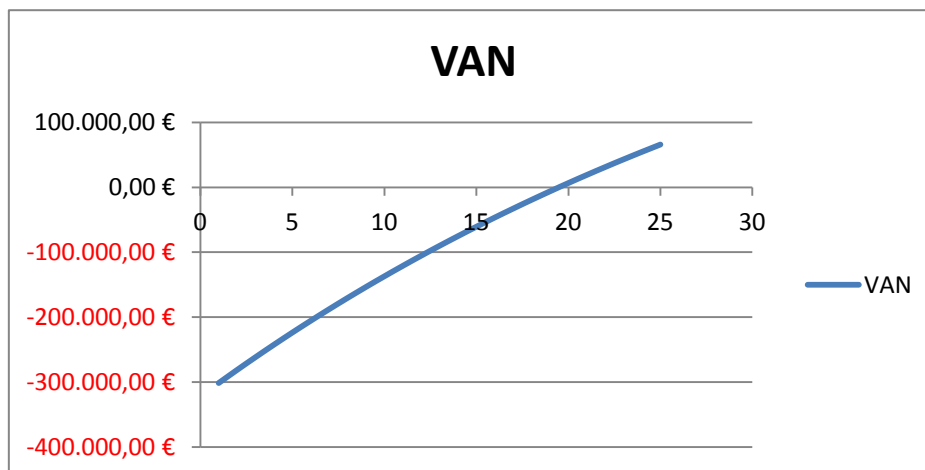
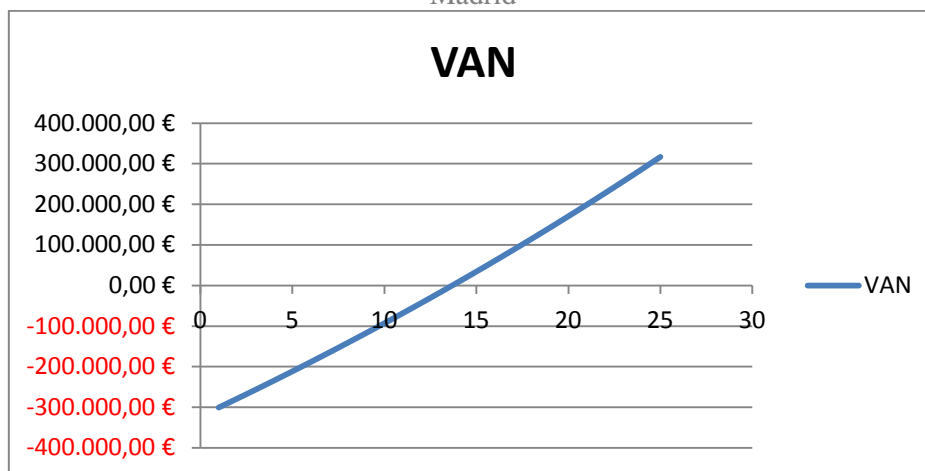


Ilustración 71 Gráfico de la evolución del VAN con interés del 3,15%

En este caso la inversión sigue siendo completamente rentable, tardándose casi 5 años más en recuperar la cantidad inicial, pero aún así dejando beneficios de casi 70000 € al final de la vida útil, lo que confirma el estudio anterior, mucho más halagüeño pero justificado al fin y al cabo.

Por último se propone un caso en el que IPC anual sea mayor al supuesto en el primer caso, dejando fijo el valor del interés tal y como estaba. Los resultados obtenidos se ven a continuación:



**Ilustración 72 Gráfico de la evolución de VAN a lo largo del año con un IPC alto**

En este caso, al estar directamente ligado el ahorro anual con el IPC, ya que las tarifas crecen proporcionalmente a ese valor cada año, se demuestra que cuanto mayor sea la subida del precio del combustible, más rentable será la instalación y más dinero ahorrará respecto a las fuentes de energía tradicionales.

### 7 Conclusiones

El objetivo del presente trabajo no era otro que el dimensionar la instalación respetando la normativa vigente, además de justificar su implantación atendiendo a criterios medioambientales y económicos.

De los resultados obtenidos, se puede decir que tanto la parte encargada de cubrir la demanda de ACS, como la destinada a calentar el agua para la piscina climatizada, cubren con creces los criterios establecidos en la norma en cuanto a fracción solar cubierta. La parte destinada a ACS además incluye el sistema de disipación exigido para contrarrestar la sobreproducción en los meses de verano, aunque sería interesante estudiar el desvío del excedente solar para ACS al circuito de piscina, lo que evitaría tener que utilizar el disipador diseñado que, por otra parte se mantendría como elemento de seguridad. Además durante el cálculo y diseño de los diferentes elementos siempre se han usado teorías aceptadas y criterios de selección adecuados, eligiendo para todo fabricantes que cumplen con las directivas europeas en sus productos.

En cuanto al ahorro de emisiones, es evidente que durante la vida útil la reducción de gases de efecto invernadero producidos es muy elevada, siendo éste un dato muy positivo. Como se mencionaba al principio del presente documento, en Europa se quiere lograr una drástica reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de aquí a diez años, siendo parte de la solución para lograrla proyectos similares al aquí desarrollado, basados en fuentes de energía alternativas a las tradicionales y con carácter renovable.

Destacar el buen papel que desempeña el intercambiador entre el agua que se desecha de la piscina y el agua de red que entra en el circuito, ya que produce un importante ahorro energético, de tal magnitud que sólo en el primer año de uso ya está amortizado su coste, y durante el resto de años útiles de la instalación ahorra hasta 91 toneladas de CO<sub>2</sub>.

También se comprueba que económicamente es un proyecto viable e atractivo. Simplemente atendiendo a los diversos escenarios para justificar su viabilidad, se puede observar que todos presentan beneficios al final de su vida útil. Si bien es cierto que el desembolso monetario a corto plazo es elevado, el beneficio económico está prácticamente asegurado incluso en situaciones dispares.

Cabe añadir que aunque el presente trabajo se trate de un proyecto simulado, tanto en su dimensionamiento como en su impacto ambiental y ahorro económico, deja clara la idea de que en instalaciones deportivas de gran tamaño dentro del entorno climático de Madrid, con piscina climatizada y gran demanda de agua caliente sanitaria, implantar una instalación termo solar que cubra parte de esas demandas es objetivamente rentable además de una alternativa interesante a la vez que ecológica.

Para acabar, se quiere dejar una reflexión para el lector. Sólo en Madrid capital, se disponen de 558 instalaciones deportivas, de las cuales 52 cuentan con piscina climatizada. Es decir, existen centros con similares características, con demanda de ACS y de climatización de piscina en algunos casos. Considerando el presente trabajo como “instalación tipo” aplicable a cada uno de ellos, podrían ahorrarse sólo en los 52 polideportivos con piscina, cerca de 107.200 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> y 11.580.000 euros, con una tecnología conocida y fiable.



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

### 7.1 Posibles alternativas para la instalación

A parte de las conclusiones desarrolladas anteriormente, se quiere dejar un espacio para la mejora del presente trabajo, mencionando posibles aspectos relacionados con las instalaciones y que se podrían modificar.

- Usar paneles con más área que disminuyan el número de captadores y subgrupos de captadores en paralelo.
- Hacer un estudio energético que determine que es más eficiente, si una instalación conjunta de ACS y agua para piscina o instalaciones separadas.
- Combinar la presente instalación de forma que suministre apoyo a la calefacción en invierno, y añadiendo máquina de absorción, climatización en verano. Esta medida necesitaría un estudio más preciso que evaluara las demandas de calefacción y de climatización del polideportivo y, para este último caso, analizar su compatibilidad con el incremento previsto de la fuente de energía solar durante el periodo de verano.
- Disipar los excesos de calor del ACS en la piscina, intentando cuantificar los mismos para no sobrepasar las necesidades de energía de la última.
- Se podría estudiar aprovechar mediante un intercambiador la energía que aún conserva el agua caliente ya usada, para calentar el agua de la piscina, de forma parecida al aprovechamiento del agua que se desecha diariamente en la piscina y el agua de red.

Algunos de los puntos anteriormente mencionados no se han llevado a cabo por falta de previsión o de tiempo, pero se perfilan como principales puntos de partida para mejorar la presente instalación.





## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

### 8 Bibliografía

#### Libros y documentos:

- [1]-Cañada Rivera, J. (2008). *Manual de energía solar térmica. Diseño y cálculo de instalaciones*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [2]-Fernández Salgado, J. M., & Gallardo Rodríguez, V. (2004). *Energía solar térmica en la edificación*. Madrid: AMV ediciones.
- [3]-M.C. Rodríguez-Hidalgo, P.A. Rodríguez-Aumente, A. Lecuona, M. Legrand, R. Ventas.(2011).  
*Domestic hot water consumption vs. solar thermal energy storage: The optimum size of the storage tank*. Elsevier.
- [4]- Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020. Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, IDAE. (2011).
- [5]- Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. RITE. (2007).
- [6]- Código Técnico de la Edificación, Documento Básico HE4, *Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria*, (2009) .
- [7]- Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura. IDAE, (2009).
- [8]- Decreto 80/1998, de 14 de mayo, por el que se regulan las condiciones higiénicas sanitarias de piscinas de uso colectivo, Comunidad de Madrid, (1998).
- [9]- RITE, Instrucción Técnica 1.2, IT 1.2 *Exigencias de Eficiencia Energética*, (2007).
- [10]- ROADMAP 2050. “A practical guide to a prosperous, low-carbon Europe” (2010).
- [11]-RITE, Instrucción Técnica 2.2, IT 2.2 *pruebas*, (2007).
- [12]- RITE, Instrucción Técnica 1.3, IT 1.3 *Exigencias de Seguridad*, (2007).
- [41]- Aenor. Norma UNE 100-155 88 “*Cálculo de vasos de Expansión*”.

#### Apuntes:

- [13]-Apuntes de la asignatura *Transferencia de Calor*. (2011).
- [14]-Apuntes de la asignatura *Instalaciones de energías renovables*. (2012).
- [15]-Apuntes de la asignatura *Instalaciones y máquinas hidráulicas*. (2011).



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

### Páginas Web:

#### Imágenes:

- [16]- Windows to universe organization, [www.windows2universe.org](http://www.windows2universe.org) Abril 2012  
“[http://www.windows2universe.org/sun/sun\\_il.html&lang=sp](http://www.windows2universe.org/sun/sun_il.html&lang=sp)”.
- [17]- Instituto Argentino de Radioastronomía. [www.iar.unlp.edu.ar](http://www.iar.unlp.edu.ar) Abril 2012  
“<http://www.iar.unlp.edu.ar/boletin/bol-mar12.htm>”.
- [18]- Microsiervos. [www.microsiervos.com](http://www.microsiervos.com) Abril 2012  
“<http://www.microsiervos.com/archivo/ciencia/tierra-perihelio.html>”.
- [19]- Boch climate. [www.boch-climate.us](http://www.boch-climate.us) Abril 2012  
“<http://www.bosch-climate.us/products-bosch-thermotechnology/solar-thermal-system/solar-hydraulics/solar-expansion-tank.html>”.
- [20]- Fundación Agencia Intermunicipal da Energía de Vigo [www.faimevi.es](http://www.faimevi.es) Junio 2012  
“<http://www.faimevi.es/docs/ORDENANZA/PARTE%20I.pdf>”.
- [21]- Terrasol [www.terrasolnet.com](http://www.terrasolnet.com) Abril 2012 “<http://www.terrasolnet.com/Termica-Centralitas-Control>”.
- [22]- Blog Captador solar. [www.captadorsolar.com](http://www.captadorsolar.com) abril 2012  
“<http://captadorsolar.com/?s=sodean>”.
- [23]- Luxxol [www.luxxol.com](http://www.luxxol.com) Abril 2012 “<http://www.luxxol.com/2011/06/6-colectores-de-placa-plana-sin.html>”.
- [24]- Hello Pro france [www.hellopro.fr](http://www.hellopro.fr) Abril 2012 “<http://www.hellopro.fr/panneaux-solaires-thermiques-2009084-fr-rubrique.html>”.
- [25]- Hello Pro france [www.hellopro.fr](http://www.hellopro.fr) Abril 2012  
“[http://www.hellopro.es/COMERCIAL\\_VASCO\\_CATALANA\\_DEL\\_COMBUSTIBLE\\_S\\_A\\_-6633-noprofil-2005596-7532-0-1-1-fr-societe.html](http://www.hellopro.es/COMERCIAL_VASCO_CATALANA_DEL_COMBUSTIBLE_S_A_-6633-noprofil-2005596-7532-0-1-1-fr-societe.html)”.
- [26]- Solo Stocks [www.solostoks.com](http://www.solostoks.com) Abril 2012 “<http://www.solostocks.com/venta-productos/maquinaria/construccion/componentes/colector-solar-tubo-vacio-20-hp65-4921023>”.
- [27]- Energía Futura [www.energíafutura.com](http://www.energíafutura.com) Mayo 2012  
“<http://energeticafutura.com/%C2%BFcuanta-energia-se-puede-extraer-de-la-radiacion-solar/>”.
- [28]- Power from the Sun [www.powerfromthesun.net](http://www.powerfromthesun.net) Mayo 2012  
“<http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter03/chapter03.html>”.
- [29]- Archi Expo [www.archiexpo.com](http://www.archiexpo.com) Abril 2012 “<http://www.archiexpo.es/prod/roth-france/depositos-de-agua-caliente-solares-699-384441.html>”.



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

[30]- Gaboelec [www.Gaboelec.com](http://www.Gaboelec.com) Abril 2012 “<http://www.gaboelec.com/tienda/tubo-de-cobre-aislado-3-8-rollo-de-20-mts.html>”.

[31]- Direct Industry [www.directindustry.com](http://www.directindustry.com) Mayo 2012 “<http://www.directindustry.es/prod/speroni/bombas-centrifugas-de-agua-37897-399654.html>”.

[32]- Trade Korea [www.tradekorea.com](http://www.tradekorea.com) Mayo 2012 “[http://www.tradekorea.com/products/plate\\_heat\\_exchanger.html](http://www.tradekorea.com/products/plate_heat_exchanger.html)”.

[33]- Val Group [www.valgroup.com](http://www.valgroup.com) Mayo 2012 “<http://www.valgroup.es/ui/productos.aspx?stk=calefaccion/350>”.

Distribuidores y fabricantes:

[34]- Salvador Escoda [www.salvadorescoda.com](http://www.salvadorescoda.com) Junio 2012 “[http://www.salvadorescoda.com/tecnico/solar/Manual\\_Energia\\_Solar\\_4a\\_ed\\_Salvador\\_Escoda.pdf](http://www.salvadorescoda.com/tecnico/solar/Manual_Energia_Solar_4a_ed_Salvador_Escoda.pdf)”.

[35]- Isempa [www.iseempa.com](http://www.iseempa.com) Junio 2012 “<http://www.iseempa.com/catalogo.asp?sec=24>”.

[36]- Viessman <http://www.viessmann.es/> Junio 2012.

[37]- Tyfocor [www.tyfocor.de](http://www.tyfocor.de) Junio 2012 “[http://www.tyfo.de/en/datenblaetter.php#techn\\_info](http://www.tyfo.de/en/datenblaetter.php#techn_info)”.

[38]- Lapesa [www.lapesa.es](http://www.lapesa.es) Mayo 2012.

[39]- Alfa laval [www.Alfalaval.es](http://www.Alfalaval.es) Mayo 2012.

[40]- Grundfos [www.Grundfos.com](http://www.Grundfos.com) Junio 2012.

Resto webs

[42]- Comunidad de Madrid [www.madrid.org](http://www.madrid.org) Junio 2012.

[43]- Ayuntamiento de Madrid [www.madrid.es](http://www.madrid.es) Junio 2012.

[44]- Comisión nacional de la energía [www.cne.es](http://www.cne.es) Junio 2012.

[45]- Instituto nacional de estadística [www.ine.es](http://www.ine.es) Junio 2012.

[46]- Instituto para la diversificación y el ahorro energético [www.idae.es](http://www.idae.es) Junio 2012.

[47]- Iberdrola [www.iberdrola.es](http://www.iberdrola.es) Junio 2012.

[48]- Joint Research Centre of European Commission “<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=es&map=europe>” Marzo 2012.

## 9 Anexos

### 9.1 Programas de Mathcad utilizados

De aquí en adelante se incluyen los programas utilizados para dimensionar las instalaciones de ACS y piscina. Los programas de intercambiador y pérdidas de carga en tuberías solo se representan mediante un ejemplo de todos los diseñados, siendo el resto de los elementos calculados a partir del mismo programa.

#### 9.1.1 Programa dimensionamiento del área y fracción solar de ACS

En un principio el programa pide la introducción de datos, que será a través de una tabla que contenga en cada columna los valores antes descritos en la sección de datos climáticos.

### CÁLCULO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR DE ACS: ACTUACIONES.

Caso simplificado: sin pérdidas en tuberías ni en acumulador. Régimen estacionario.

#### 1.- DATOS:

TA :=   
 en datos total y datos mensual y anual y datos s

$$i := 1..rows(TA)$$

$$T_{0C} := TA^{(5)}$$

$$T_{redC} := TA^{(7)}$$

$$A_{col} := 292.446 \cdot m^2$$

$$NUM := 126$$

$$H_{ad} := TA^{(1)}$$

$$Hd_{ad} := TA^{(2)}$$

Latitud:

$$\phi := 40.33 \cdot deg$$

Inclinación:

$$\beta := 45deg$$

Orientación:

$$\gamma := 0 \cdot deg$$

Reflectividad del suelo:

$$\rho_g := 0.2$$

$$H_{ad_i} := H_{ad_i} \cdot \frac{W \cdot hr}{m^2}$$

$$Hd_{ad_i} := Hd_{ad_i} \cdot \frac{W \cdot hr}{m^2}$$

Temperatura ambiente:

$$T_0 := T_{0C} \cdot K + 273.15 \cdot K$$



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

Se definen las variables en función de la columna de la tabla en la que están los datos de las mismas.

El programa deja sin definir la latitud, la reflectividad del suelo, el grado de inclinación de captadores y la orientación respecto al sur.

La latitud es conocida y por tanto se introduce su valor en grados decimales.

La reflectividad del suelo se aproxima al valor constante de 0.2

La orientación respecto al sur será 0

La inclinación de los captadores será optimizada de manera que en función de los resultados se elegirá la más adecuada. En este caso, el valor óptimo para la demanda se  $45^\circ$

Se obtiene el valor de  $n$ , número del día del año, para cada día medio de cada mes mediante la siguiente expresión

$diasmes :=$

	1
1	31
2	28
3	31
4	30
5	31
6	30
7	31
8	31
9	30
10	31
11	30
12	31

$$n_i := \left( \sum_{mes=1}^i diasmes_{mes} \right) - \frac{diasmes_i}{2}$$

Ecuación 1 obtención del día medio del mes

$$\sum_{mes=1}^{12} diasmes_{mes} = 365$$

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

	1
1	15.5
2	45
3	74.5
4	105
5	135.5
n = 6	166
7	196.5
8	227.5
9	258
10	288.5
11	319
12	349.5

Tabla 61 Días medios de cada mes.

Una vez conocido el valor de n para cada día medio de cada mes, se obtiene el valor de la declinación de la tierra para ese día.

$$\delta_i = \left[ 23.45 \cdot \deg \cdot \sin \left[ \frac{360 \cdot \deg}{365} \cdot (284 + n) \right] \right]$$

Ecuación 2 ángulo de declinación para cada día del mes.

En función de la latitud y la declinación, se obtienen los valores del ángulo horario para plano horizontal y plano inclinado.

Angulo horario de salida y puesta del sol sobre el plano horizontal (z):

$$\omega_{sz_i} := \arccos(-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta_i))$$

Angulo horario de salida y puesta del sol sobre el plano inclinado (T):

$$\omega_{sT_i} := \arccos(-\tan(\phi - \beta) \cdot \tan(\delta_i))$$

Esta expresión sólo es aplicable cuando  $\gamma = 0$ , y es la que hay que aplicar en ese caso, porque las otras no dan solución en ese caso.

$$x := \text{if} \left( \gamma = 0, 0, \frac{\cos(\phi)}{\sin(\gamma) \cdot \tan(\beta)} + \frac{\sin(\phi)}{\tan(\gamma)} \right) = 0$$

$$y_i := \text{if} \left[ \gamma = 0, 0, \tan(\delta_i) \cdot \left( \frac{\sin(\phi)}{\sin(\gamma) \cdot \tan(\beta)} - \frac{\cos(\phi)}{\tan(\gamma)} \right) \right]$$

Salida del sol para el captador (plano inclinado):

$$\omega_{srT_i} := \min \left[ \omega_{sz_i}, \text{if} \left[ \gamma = 0, \omega_{sT_i}, \text{if} \left[ \gamma > 0, \arccos \left[ \frac{-x \cdot y_i - \sqrt{x^2 - (y_i)^2 + 1}}{x^2 + 1} \right], \arccos \left[ \frac{-x \cdot y_i + \sqrt{x^2 - (y_i)^2 + 1}}{x^2 + 1} \right] \right] \right] \right]$$

Puesta del sol para el captador (plano inclinado):

$$\omega_{ssT_i} := \min \left[ \omega_{sz_i}, \text{if } \gamma = 0, \omega_{sT_i}, \text{if } \gamma > 0, \text{acos} \left[ \frac{-x \cdot y_i + \sqrt{x^2 - (y_i)^2 + 1}}{x^2 + 1} \right], \text{acos} \left[ \frac{-x \cdot y_i - \sqrt{x^2 - (y_i)^2 + 1}}{x^2 + 1} \right] \right]$$

$$h_{sz_i} := 2 \omega_{sz_i} \cdot \frac{24 \cdot \text{hr}}{360 \cdot \text{deg}}$$

$$h_{sT_i} := \left( \omega_{srT_i} + \omega_{ssT_i} \right) \cdot \frac{24 \cdot \text{hr}}{360 \cdot \text{deg}}$$

$$HW := \left( \frac{H}{h_{sz}} \right)$$

$$HdW := \left( \frac{Hd}{h_{sz}} \right)$$

Mediante la siguiente expresión se obtiene el valor de la radiación extraterrestre para plano horizontal.

Irradiación extraterrestre diaria:

$$G_{0n_i} := 1367 \cdot \left( 1 + 0.033 \cdot \cos \left( \frac{360 \cdot n_i}{365} \cdot \text{deg} \right) \right) \cdot \frac{W}{m^2}$$

Ecuación 3 Irradiación extraterrestre en función del día del año

$$H_{0_i} := 2 \cdot \frac{12 \cdot 3600 \cdot s \cdot G_{0n_i}}{\pi} \cdot \left( \cos(\phi) \cdot \cos(\delta_i) \cdot \sin(\omega_{sz_i}) + \omega_{sz_i} \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\delta_i) \right)$$

$$H_{0\beta_i} := 2 \cdot \frac{12 \cdot 3600 \cdot s \cdot G_{0n_i}}{\pi} \cdot \left( \cos(\phi - \beta) \cdot \cos(\delta_i) \cdot \sin(\omega_{ssT_i}) + \omega_{ssT_i} \cdot \sin(\phi - \beta) \cdot \sin(\delta_i) \right)$$

$$\omega_{srT_i} := -\omega_{srT_i}$$

$$H_{0\beta\gamma_i} := \frac{12 \cdot 3600 \cdot s \cdot G_{0n_i}}{\pi} \cdot \left( \sin(\delta_i) \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\beta) \cdot \left| \omega_{ssT_i} - \omega_{srT_i} \right| - \sin(\delta_i) \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\beta) \cos(\gamma) \cdot \left| \omega_{ssT_i} - \omega_{srT_i} \right| + \cos(\phi) \right)$$

Índice de transparencia atmosférica

$$k_{T_i} := \frac{H_i}{H_{0_i}}$$

Proporción de radiación difusa

Correlación de Vázquez y Santos corregida por declinación (Rodríguez 2010):

Para ser utilizada en la estimación de la fracción de radiación difusa, cuando no se dispone de datos de irradiación difusa diaria.

$$k_{dVSc_i} := \begin{cases} k_{T_i} & \text{if } k_{T_i} \leq 0.15 \\ \left[ (0.56 + 0.02 \cdot \delta_i)^{0.35} \cdot \left[ -0.0434526 + 1.55331 \cdot k_{T_i} - 1.82879 \cdot (k_{T_i})^2 \right] \right] & \text{if } 0.15 \leq k_{T_i} < 0.77 \\ 0.06 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{dVSc_i} := \frac{k_{dVSc_i}}{k_{T_i}}$$

Vázquez y Santos definen  $K_d$  como  $H_d/H_0$  en lugar de como hace el resto ( $H_d/H$ ).

$K_d$  experimental:

$$k_{d_i} := \frac{H_{d_i}}{H_i}$$

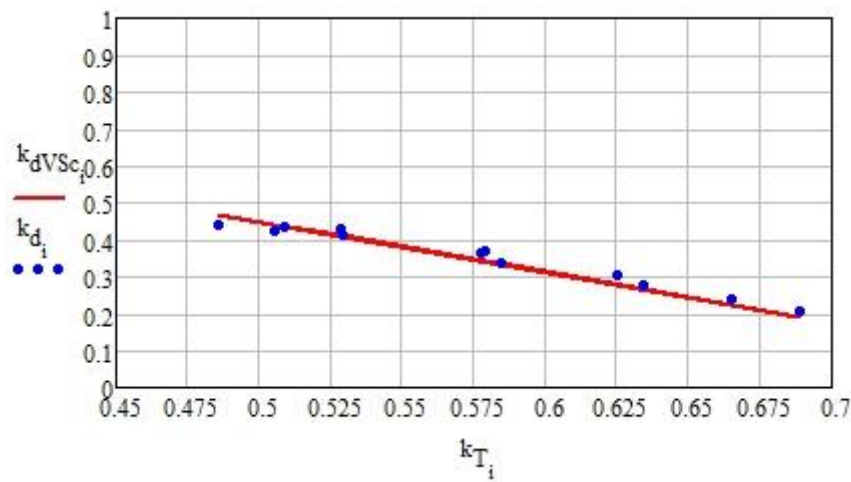
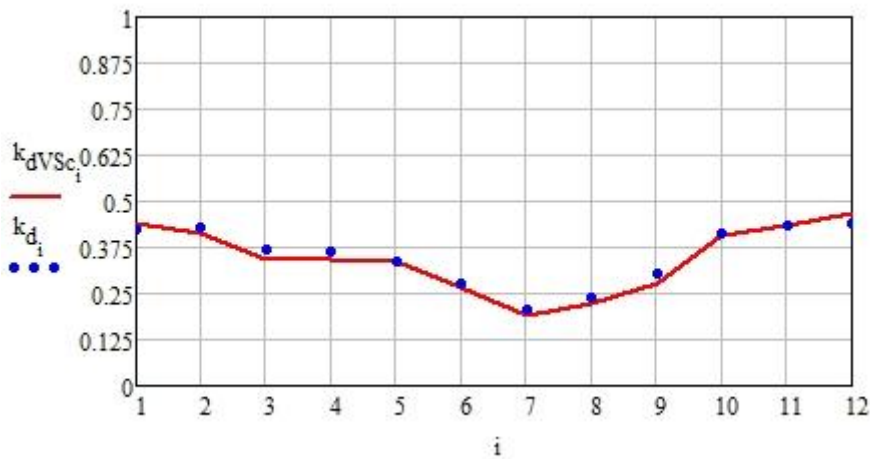


Ilustración 73 Gráfica de la proporción de radiación difusa y su correlación para tiempo solar verdadero



$$H_{dmod_i} := H_i \cdot k_{dVSc_i}$$

$$H_{bmod_i} := H_i - H_{dmod_i}$$

$$H_{b_i} := H_i - H_{d_i}$$



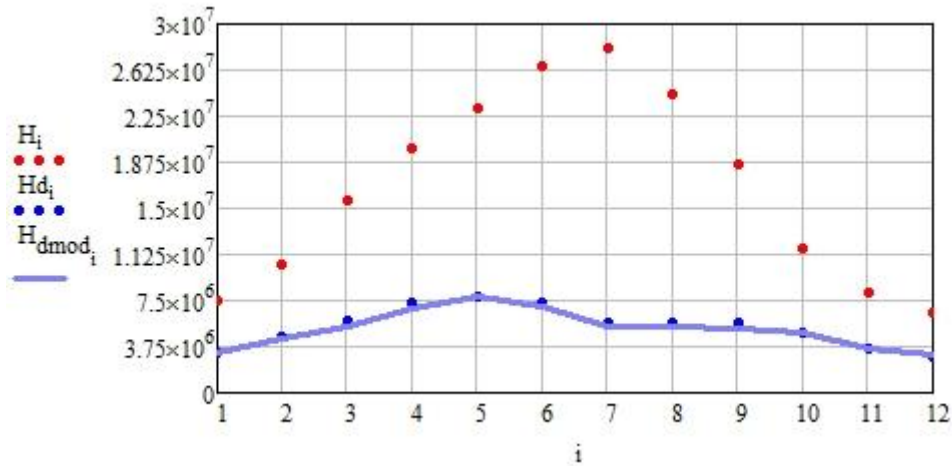


Ilustración 74 Grafica de irradiación diaria total, difusa y modelo

Como se puede comprobar, el modelo descrito y los datos de irradiación difusa son muy similares. Esto es porque se están tratando datos de la ciudad de Madrid, que es en la que se basa el modelo.

A partir de los datos anteriores, se describen los dos modelos de cielo que describirán la radiación para un plano inclinado:

#### **Radiación sobre plano inclinado:**

Cálculo de  $R_b$  y de los factores de forma de la superficie inclinada (captador):

$$H_{0T_i} := \text{if}(\gamma = 0, H_{0\beta_i}, H_{0\beta\gamma_i})$$

$$R_{b_i} := \frac{H_{0T_i}}{H_{0_i}}$$

$$F_{c_s} := \frac{1 + \cos(\beta)}{2} = 0.787$$

$$F_{c_g} := \frac{1 - \cos(\beta)}{2} = 0.213$$

Modelo isotrópico:

$$H_{T\_directa_i} := H_{b_i} \cdot R_{b_i}$$

$$H_{T\_difusa\_iso_i} := H_{d_i} \cdot F_{c_s}$$

$$H_{T\_reflejada_i} := H_i \cdot \rho_g \cdot F_{c_g}$$

$$H_{T\_iso_i} := H_{T\_directa_i} + H_{T\_difusa\_iso_i} + H_{T\_reflejada_i}$$

Modelo anisotrópico o HDKR (Hay, Davies, Klucher & Reindl):

$$A_{t_i} := \frac{H_{b_i}}{H_{0_i}}$$

$$f_i := \sqrt{\frac{H_{b_i}}{H_i}}$$

$$H_{T\_directa_i} := H_{b_i} \cdot R_{b_i}$$

$$H_{T\_difusa\_circun_i} := H_{d_i} \cdot A_{t_i} \cdot R_{b_i}$$

$$H_{T\_difusa\_cielo_i} := H_{d_i} \cdot (1 - A_{t_i}) \cdot F_{c\_s}$$

$$H_{T\_difusa\_horizonte_i} := H_{d_i} \cdot (1 - A_{t_i}) \cdot f_i \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)^3$$

$$H_{T\_reflejada_i} := H_i \cdot \rho_g \cdot F_{c\_g}$$

$$H_{T\_aniso_i} := H_{T\_directa_i} + H_{T\_difusa\_circun_i} + H_{T\_difusa\_cielo_i} + H_{T\_difusa\_horizonte_i} + H_{T\_reflejada_i}$$

Habilitar una de las dos expresiones para elegir entre modelo isotrópico o anisotrópico.

$$HW_{T_i} := \frac{H_{T\_aniso_i}}{h_{sT_i}}$$

$$HW_{T_i} := \frac{H_{T\_iso_i}}{h_{sT_i}}$$

El modelo habilitado será el anisotrópico, ya que sin ser mucho más complejo, deja datos más próximos a la realidad.

**Datos de demanda:**

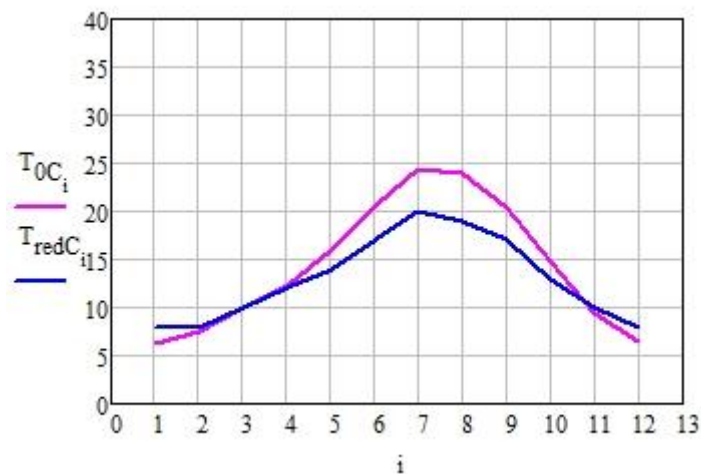


Ilustración 75 Gráfica de la temperatura media ambiente diurna y la temperatura del agua de red a lo largo del año

Los datos introducidos aquí corresponden a los captadores seleccionados.

**Rendimiento del captador y parámetros de la instalación:**

$$\begin{aligned} a_0 &:= 0.793 \\ a_1 &:= 3.95 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \\ a_2 &:= 0.0122 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^2} \end{aligned}$$

La efectividad tiene un valor de 0.5 por defecto

Efectividad del IC:

$$\varepsilon_{ic} := 0.5$$

La proporción de anticongelante en el fluido ya se ha obtenido antes. Sus propiedades figuran en las gráficas de los anexos.

Propiedades del, flujo primario (agua con propilenglicol al 35%):

$$\begin{aligned} c_{p1} &:= 3850 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \\ \rho_1 &:= 1015 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

Propiedades del, flujo secundario (agua pura):

$$\begin{aligned} c_{p2} &:= 4180 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \\ \rho_2 &:= 992 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

Propiedades del, flujo de consumo (agua pura):

$$\begin{aligned} c_{p\text{cons}} &:= 4180 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \\ \rho_{\text{cons}} &:= 992 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

El valor de los metros cúbicos del consumo es el obtenido de dividir la demanda mensual entre el número de días del mes.

Dividiendo el consumo mensual entre el número de días de cada mes obtenemos los metros cúbicos de agua netos necesarios para cada día.

Consumo diario de ACS:

Vconsdia :=	12.97	m <sup>3</sup>
	17.07	
	16.35	
	15.23	
	14.67	
	12.83	
	8.39	
	4.78	
	12.67	
	15.55	
	15.53	
	11.94	

Dividiendo el volumen de agua necesario entre las horas de sol disponibles obtenemos el caudal volumétrico diario.

$V_{\text{volumétrico}} := \frac{V_{\text{consdia}}}{h_s T} =$	1	3.817 · 10 <sup>-4</sup>	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
	2	4.552 · 10 <sup>-4</sup>	
	3	3.881 · 10 <sup>-4</sup>	
	4	3.626 · 10 <sup>-4</sup>	
	5	3.602 · 10 <sup>-4</sup>	
	6	3.2 · 10 <sup>-4</sup>	
	7	2.078 · 10 <sup>-4</sup>	
	8	1.153 · 10 <sup>-4</sup>	
	9	2.952 · 10 <sup>-4</sup>	
	10	3.971 · 10 <sup>-4</sup>	
	11	4.441 · 10 <sup>-4</sup>	
	12	3.632 · 10 <sup>-4</sup>	

Tabla 62 Caudal volumétrico medio diario para cada mes

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

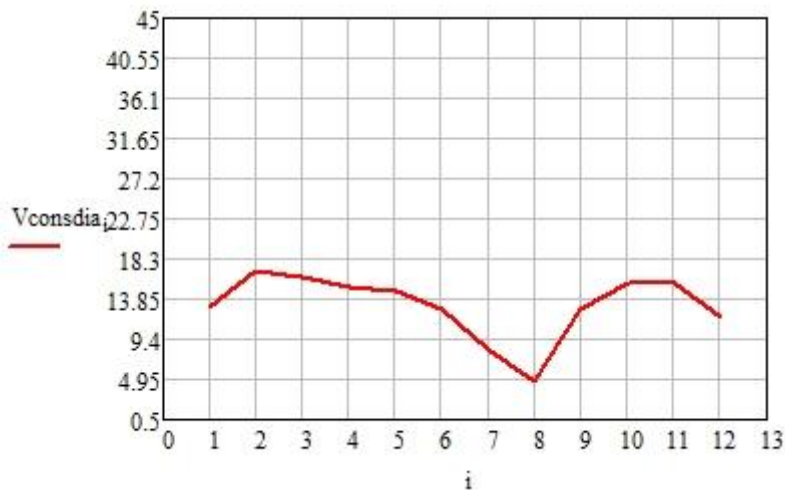


Ilustración 76 Gráfica de la evolución de la demanda de agua caliente sanitaria a lo largo del año

$$m_{\text{cons}} := \frac{V_{\text{consdia}} \cdot \rho_{\text{cons}}}{h_s T} =$$

	1
1	0.379
2	0.452
3	0.385
4	0.36
5	0.357
6	0.317
7	0.206
8	0.114
9	0.293
10	0.394
11	0.441
12	0.36

$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$

Tabla 63 Gastos máscicos medios mensuales de ACS a lo largo del año

Temperatura de ACS:

$$T_{\text{sum}} := 60 \cdot \text{K} + 273.15 \cdot \text{K}$$

$$T_{\text{red}} := T_{\text{redC}} \cdot \text{K} + 273.15 \cdot \text{K}$$

$$Q_{\text{cons}} := [m_{\text{cons}} \cdot c_{p_{\text{cons}}} \cdot (T_{\text{sum}} - T_{\text{red}})]$$

Ecuación 4 Potencia térmica demandada por la instalación

El valor del grado de estratificación se asumirá constante y conocido, siendo 0.25.

Grado de estratificación del acumulador:

$$Et := 0.25$$

Definido como:  $(T_{\text{cons}} - T_t) / (T_{\text{ico}} - T_t)$

### Valores iniciales de los parámetros variables:

Gasto másico del primario calculado en función de la superficie de captadores y la recomendación del fabricante:

El parámetro variable en esta expresión es el número de litros hora por acumulador. Según el fabricante, este valor podría fluctuar entre 60l/h y 140l/h, estando el valor incluido entre ambos.

$$m1 := 85 \cdot \frac{L}{hr} \cdot \frac{1}{2.321 \cdot m^2} \cdot \rho1 \cdot A_{col}$$

$$A_{panel} := 2.321$$

$$m1 = 3.02 \frac{kg}{s}$$

$$C1 := m1 \cdot cp1$$

$$C1 = 1.163 \times 10^4 \frac{1}{K} \cdot W$$

Gasto másico del secundario:

Se hace la aproximación de que ambos flujos son idénticos, trabajando el intercambiador con flujos simétricos.

$$m2 := m1$$

$$m2 = 3.02 \frac{kg}{s}$$

$$C2 := m2 \cdot cp2$$

$$C2 = 1.262 \times 10^4 \frac{1}{K} \cdot W$$

$$C_{min} := \min(C1, C2)$$

$$C_{min} = 1.163 \times 10^4 \frac{1}{K} \cdot W$$

### Valores iniciales de las incógnitas:

Es un parámetro crítico, ya que la herramienta de cálculo Mathcad necesita que los valores iniciales estén próximos a los reales, sino puede llegar a dar problemas de convergencia.

$$T_{ici_1} := 40 \cdot K + 273.15 \cdot K$$

$$T_{ci_1} := 40 \cdot K + 273.15 \cdot K$$

$$T_{co_1} := 45 \cdot K + 273.15 \cdot K$$

$$T_{co,i} := 80 \cdot K + 273.15 \cdot K$$

$$T_{cons,i} := 45 \cdot K + 273.15 \cdot K$$

$$T_{m,i} := \frac{T_{co,i} + T_{ci,i}}{2}$$

$$T_t := \frac{T_{co} + T_{red}}{2}$$

Fracción solar estimada:

$$f_i := 0.6$$

### Sistema de ecuaciones:

En él se describen todos los balances antes explicados, que posibilitan la resolución del sistema de ecuaciones, y por tanto, de la fracción solar cubierta.

Dado

$$[C1 \cdot (T_{co} - T_{ci})] = \left[ HW_T \cdot A_{col} \cdot \left[ a_0 - \frac{T_m - T_0}{HW_T} \cdot a_1 - a_2 \cdot \left( \frac{T_m - T_0}{HW_T} \right)^2 \cdot HW_T \right] \right]$$

$$[C1 \cdot (T_{co} - T_{ci})] = [C2 \cdot (T_{co} - T_{ci})]$$

$$\epsilon_{ic} = \frac{C2 \cdot (T_{co} - T_{ci})}{C_{min} \cdot (T_{co} - T_{ci})}$$

$$[C2 \cdot (T_{co} - T_{ci})] = [m_{cons} \cdot c_{pcons} \cdot (T_{cons} - T_{red})]$$

$$f = \frac{T_{cons} - T_{red}}{T_{sum} - T_{red}}$$

$$E_t = \frac{T_{cons} - T_t}{T_{co} - T_t}$$

$$T_t = \frac{T_{co} \cdot m_2 + T_{red} \cdot m_{cons}}{m_2 + m_{cons}}$$

$$T_m = \frac{(T_{co} + T_{ci})}{2}$$

```

var1
var2
var3
var4
var5 := Find(Tci, Tci, Tco, Tco, Tcons, Tt, f, Tm)
var6
var7
var8

```

```

Tci := var1
Tci := var2
Tco := var3
Tco := var4
Tcons := var5
Tm := var8
Tt := var6
f := var7
εic = 0.5
Et = 0.25

```

```
Acol = 292.446 m2
```

$$\eta_c := \left[ a_0 - \frac{T_{ci} - T_0}{HW_T} \cdot a_1 - a_2 \cdot \left( \frac{T_{ci} - T_0}{HW_T} \right)^2 \right] \cdot HW_T$$

$$Q_{col} := [C1 \cdot (T_{co} - T_{ci})]$$

## Resultados:

Para obtener unos datos realistas con la instalación, se restan a los totales las aportaciones del mes de agosto, que como se dijo previamente, permanece cerrado gran parte de sus días y por lo tanto no es adecuado incluirlo en el estudio.

$$\eta_{c_{medio\_recal}} := \frac{\left[ \sum_{i=1}^{12} (\eta_{c_i}) \right] - \eta_{c_8}}{11} = 0.416$$

Ecuación 4 Valor del rendimiento medio a lo largo del año

Este valor de rendimiento y potencia térmica obtenida si tienen en cuenta Agosto, por lo que no son los definitivos.



$$\text{mean}(\eta_c) = 0.403$$

$$\text{mean}(Q_{col}) = 4.895 \times 10^4 \text{ W}$$

$$\text{mean}(f) = 0.826$$

Valor del rendimiento mes a mes.

	1
1	0.421
2	0.46
3	0.432
4	0.417
5	0.42
$\eta_c =$ 6	0.401
7	0.316
8	0.215
9	0.394
10	0.449
11	0.456
12	0.413

Tabla 64 Valor del rendimiento medio mensual

Ecuación de la fracción solar cubierta, excluyendo Agosto.

$$f_{\text{anual}} := \frac{\left[ \sum_{i=1}^{12} ((Q_{col_i})) \right] - Q_{col_g}}{\left[ \sum_{i=1}^{12} ((Q_{cons_i})) \right] - Q_{cons_g}}$$

Ecuación 5 Fracción solar cubierta

$$f_{\text{anual}} = 0.713$$

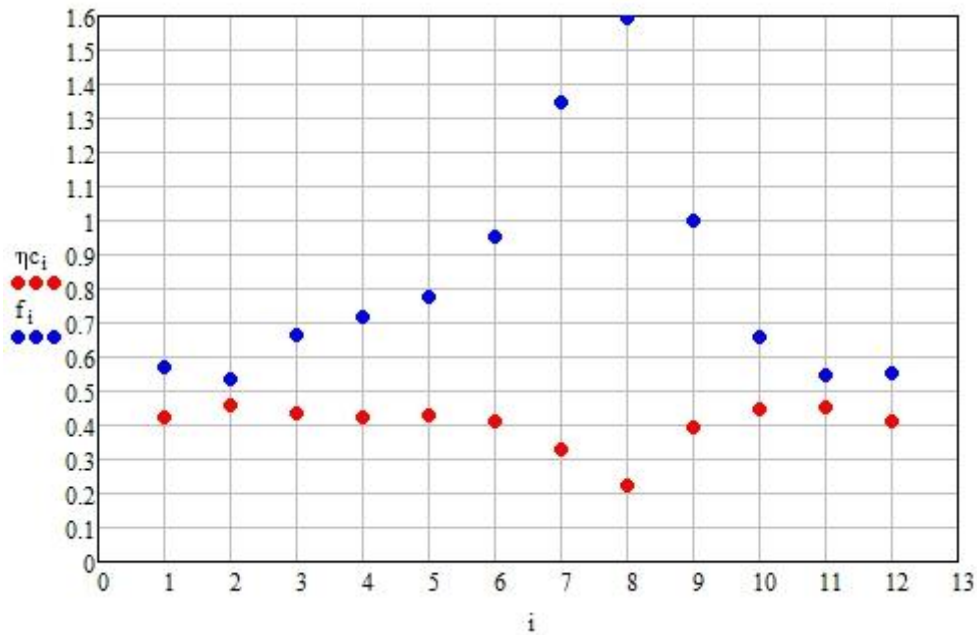


Ilustración 77 Valores del rendimiento y la fracción solar a lo largo del año

Valores finales de potencia térmica lograda por los colectores, fracción solar cubierta y potencia térmica demandada por la instalación, mes a mes.

	1
1	$4.526 \cdot 10^4$
2	$5.231 \cdot 10^4$
3	$5.441 \cdot 10^4$
4	$5.353 \cdot 10^4$
5	$5.507 \cdot 10^4$
Q <sub>col</sub> = 6	$5.605 \cdot 10^4$ W
7	$4.761 \cdot 10^4$
8	$3.191 \cdot 10^4$
9	$5.391 \cdot 10^4$
10	$5.112 \cdot 10^4$
11	$4.896 \cdot 10^4$
12	$4.157 \cdot 10^4$

Tabla 65 Potencia térmica suministrada por la instalación para un día medio del mes

	1
1	0.55
2	0.533
3	0.676
4	0.756
5	0.835
f = 6	1.035
7	1.448
8	1.675
9	1.029
10	0.661
11	0.532
12	0.531

Tabla 66 Fracción solar

	1
1	$8.23 \cdot 10^4$
2	$9.814 \cdot 10^4$
3	$8.046 \cdot 10^4$
4	$7.216 \cdot 10^4$
5	$6.87 \cdot 10^4$
Qcons = 6	$5.706 \cdot 10^4$ W
7	$3.447 \cdot 10^4$
8	$1.96 \cdot 10^4$
9	$5.263 \cdot 10^4$
10	$7.739 \cdot 10^4$
11	$9.207 \cdot 10^4$
12	$7.831 \cdot 10^4$

Tabla 67 Potencia térmica demandada para cada día característico del mes

Para hablar en términos de energía obtenida en la instalación, se multiplica la potencia térmica cubierta mediante energía solar por el valor de horas de sol en el que se obtiene.

La energía de julio que se obtiene una vez cubierta la demanda al completo es inútil, y por lo tanto no interesa cuantificarla en la energía obtenida.

$$\text{Energía}_{\text{inútil}} := Q_{\text{col}_7} \cdot h_{sT_7} \cdot (f_7 - 1) = 9.021 \times 10^8 \text{ J}$$

$$Q_{\text{col}_8} \cdot h_{sT_8} = 1.361 \times 10^9 \text{ J}$$

La energía producida en Agosto tampoco interesa a lo hora de evaluar la energía producida.

$$\text{Energía}_{\text{total\_produccio}} := \left[ \sum_{i=1}^{12} \left( (Q_{\text{col}_i} \cdot h_s T_i) \right) \right] - (Q_{\text{col}_8} \cdot h_s T_8) = 2.221 \times 10^{10} \text{ J}$$

Finalmente, se describe la energía neta obtenida por los captadores con la siguiente expresión:

$$\text{Energía}_{\text{neta}} := \text{Energía}_{\text{total\_produccio}} - \text{Energía}_{\text{inutil}} = 2.131 \times 10^{10} \text{ J}$$

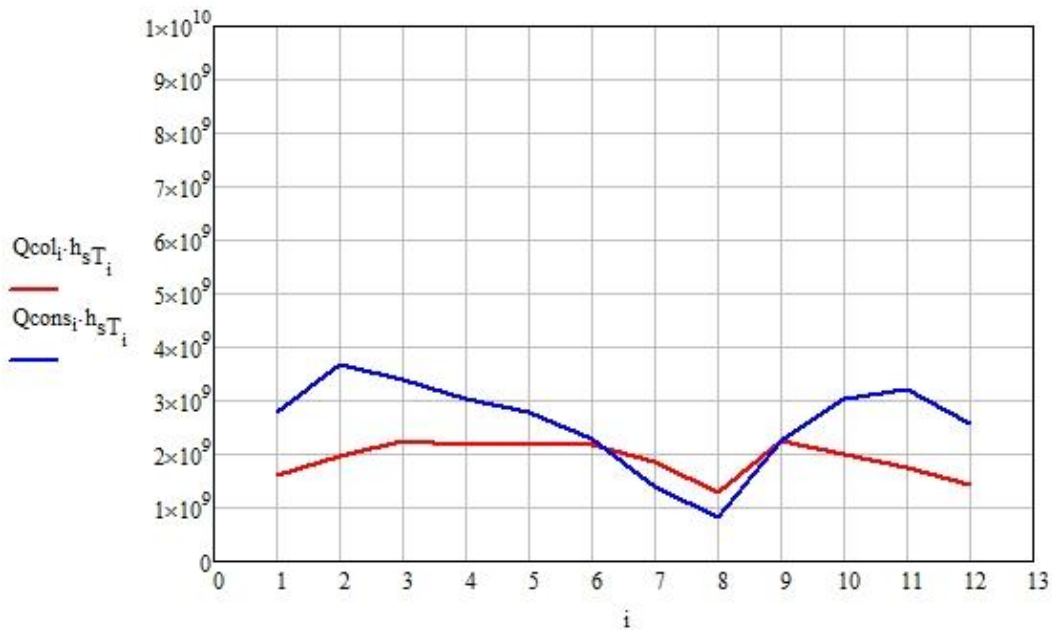


Ilustración 78 Gráfica de la energía neta producida por la instalación y la demandada

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

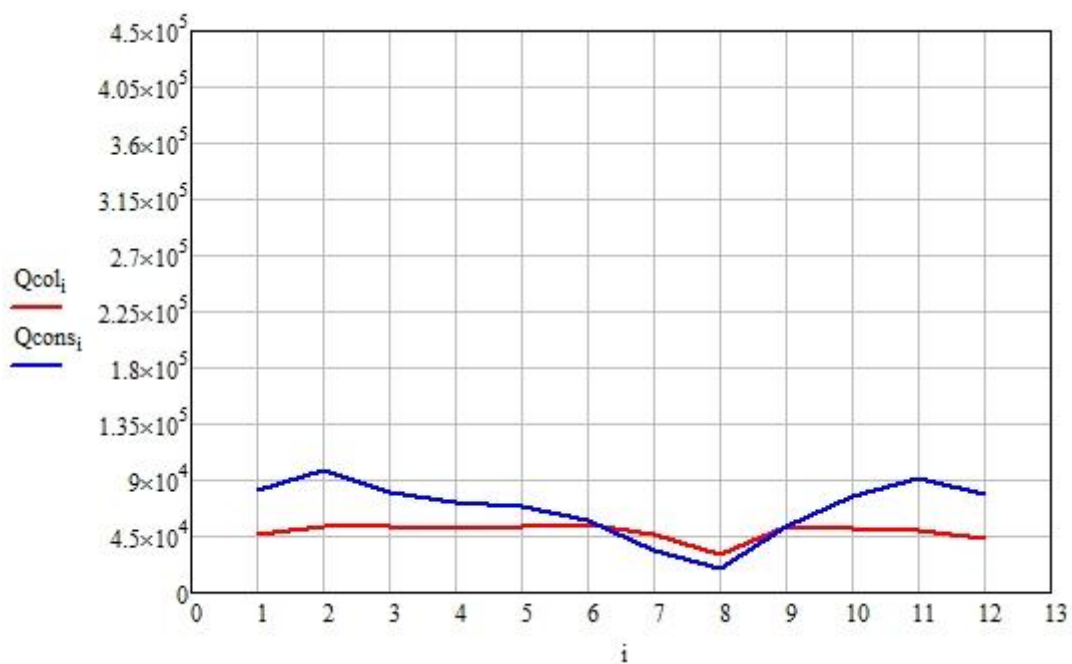


Ilustración 79 Gráfica de la potencia térmica neta producida por la instalación y la demandada

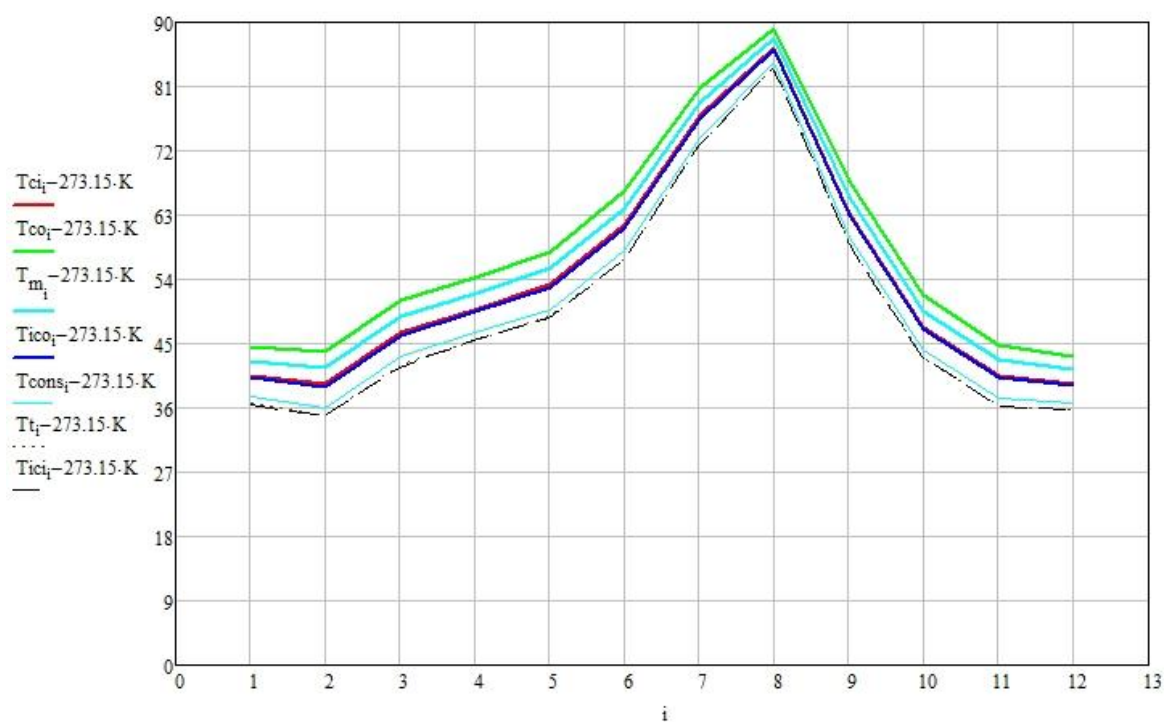


Ilustración 80 Gráfica de la evolución de las temperaturas en distintos puntos de la instalación a lo largo del año

### 9.1.2 Programa dimensionamiento del área y fracción de la piscina

El presente programa está desarrollado a partir del anterior, retocando las ecuaciones a resolver y los parámetros a introducir para que fueran válidos en el dimensionamiento del agua caliente necesaria para cubrir la demanda de la piscina. Por lo tanto, se omite la explicación de las partes iguales a las antes descritas, que aunque forman parte del presente programa no aportan nada al entendimiento del trabajo.

En este caso la introducción de datos es igual que antes, siendo diferente los valores requeridos por el programa, como ya se explicó anteriormente. La primera parte de esta hoja de cálculo se destina al cálculo de los parámetros necesarios para la resolución de la segunda.

#### Primera parte:

Se definen las nuevas variables a partir de los datos introducidos en la tabla.

```
TA := E:\...\datos piscina.txt

i := 1..rows(TA)
m_agua_red := TA<8>
T_red := TA<7>
m_recirculado := TA<6>
T_salida_piscina_i := 28.5·K + 273.15·K = ...
T_red := T_red·K + 273.15·K
```

El valor de las pérdidas de calor en la piscina se obtiene mediante la ecuación del pliego de condiciones del IDAE, como anteriormente se había mencionado

Perdidas de calor calculadas según Pliego de condiciones de IDAE

$$Q_{\text{piscina}} := 64.67 \text{ kW} = 6.467 \times 10^4 \text{ W}$$

Propiedades del agua: entalpía de vaporización, densidad y calor específico.

$$h_{fg} := 2257 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$\rho := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$c_p := 4180 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Porcentaje de pérdidas debidas a evaporación según IDAE

$$Q_{\text{evaporación}} := Q_{\text{piscina}} \cdot 85\% = 5.497 \times 10^4 \text{ W}$$

Caudales máscicos

$$m_{\text{evaporación}} := \frac{Q_{\text{evaporación}}}{h_{fg}} = 0.024 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Las variables de las tablas se ponen en unidades de gasto másico

$$m_{\text{recirculado}} := \left( m_{\text{recirculado}} \cdot \frac{\text{m}^3}{24 \cdot \text{hr}} \right) \cdot \rho$$

$$m_{\text{agua\_red}} := \left( m_{\text{agua\_red}} \cdot \frac{\text{m}^3}{24 \cdot \text{hr}} \right) \cdot \rho$$

$$m_{\text{desborde}} := m_{\text{agua\_red}} - m_{\text{evaporación}}$$

$$m_{\text{entrada\_piscina}} := m_{\text{recirculado}} + m_{\text{agua\_red}}$$

Para justificar la instalación de un intercambiador de calor con el agua de la salida de la piscina se calcula las pérdidas por arrojar el agua directamente al desagüe.

Pérdidas de calor debidas a desborde. Sin tener intercambiador

$$Q_{\text{desborde\_sin}} := \left[ m_{\text{desborde}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{salida\_piscina}} - T_{\text{red}}) \right]$$

Aplicando la ecuación del balance de energía en la piscina antes descrita en el trabajo, conocido el caudal de agua, se obtiene la diferencia de temperaturas necesaria para aportar el calor que se pierde.

Balance de energía en la piscina

$$\Delta T_{\text{piscina}} := \frac{Q_{\text{piscina}}}{m_{\text{entrada\_piscina}} \cdot c_p} =$$

	1
1	7.133
2	6.758
3	6.497
4	7.091
5	6.55
6	6.398
7	6.897
8	6.112
9	6.815
10	6.687
11	6.683
12	6.786

K

Tabla 68 Diferencias de temperaturas en el agua de entrada y salida

$$T_{\text{entrada\_piscina}} := T_{\text{salida\_piscina}} + \Delta T_{\text{piscina}} =$$

	1
1	308.783
2	308.408
3	308.147
4	308.741
5	308.2
6	308.048
7	308.547
8	307.762
9	308.465
10	308.337
11	308.333
12	308.436

K

Tabla 69 Temperaturas del agua de entrada a la piscina

### Cálculo del intercambiador antes mencionado

Intercambiador de calor del agua de desborde y el agua de renovación

$$C1 := m_{\text{agua\_red}} \cdot c_p$$

$$C2 := m_{\text{desborde}} \cdot c_p$$

$m_{\text{agua\_red}}$  siempre mayor que  $m_{\text{desborde}}$ , ambos con el mismo  $C_p$

Fórmula de la eficacia en un intercambiador

$$\epsilon_{\text{eficacia}} := 0.5$$

$$\epsilon_{\text{eficacia}} := \frac{m_{\text{desborde}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{salida\_piscina}} - T_{\text{desague}})}{m_{\text{desborde}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{salida\_piscina}} - T_{\text{red}})}$$

Se obtienen ambas temperaturas de salida del intercambiador a lo largo de los meses.

$$T_{\text{desague}} := T_{\text{salida\_piscina}} - \left[ \epsilon_{\text{eficacia}} \cdot (T_{\text{salida\_piscina}} - T_{\text{red}}) \right]$$

$$T_{\text{entrada\_agua}} := T_{\text{red}} + \left[ \epsilon_{\text{eficacia}} \cdot \frac{m_{\text{desborde}}}{m_{\text{agua\_red}}} \cdot (T_{\text{salida\_piscina}} - T_{\text{red}}) \right]$$



$$Q_{\text{intercambiador1}} := \overrightarrow{[m_{\text{agua\_red}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{entrada\_agua}} - T_{\text{red}})]} = \begin{matrix} & 1 \\ 1 & 2.284 \cdot 10^3 \\ 2 & 2.036 \cdot 10^3 \\ 3 & 1.99 \cdot 10^3 \\ 4 & 1.914 \cdot 10^3 \\ 5 & 1.672 \cdot 10^3 \\ 6 & 1.398 \cdot 10^3 \\ 7 & 476.143 \\ 8 & 4.09 \cdot 10^3 \\ 9 & 1.176 \cdot 10^3 \\ 10 & 1.727 \cdot 10^3 \\ 11 & 2.16 \cdot 10^3 \\ 12 & 1.917 \cdot 10^3 \end{matrix} \text{ W}$$

Tabla 70 Potencia térmica intercambiada

$$T_{\text{entrada\_vaso}} := T_{\text{salida\_piscina}}$$

La temperatura necesaria aportar por caldera o por energía solar térmicas será la temperatura de entrada a la piscina, que renombraremos como Tsum

$$T_{\text{sum}} := T_{\text{entrada\_piscina}}$$

### Segunda parte:

Cálculo del área necesaria para cubrir la fracción solar mínima en piscina

Caso simplificado: sin pérdidas en tuberías ni en acumulador. Régimen estacionario.

#### 1.- DATOS:

$$H_{\text{ad}} := TA^{(1)}$$

$$T_{0C} := TA^{(5)}$$

$$T_{\text{redC}} := TA^{(7)}$$

$$NUM := 70$$

$$A_{\text{col}} = 162.47 \text{ m}^2$$

$$H_{\text{d\_ad}} := TA^{(2)}$$

Latitud:

$$\phi := 40.3 \text{ deg}$$

Inclinación:

$$\beta := 45 \text{ deg}$$

Orientación:

$$\gamma := 0 \text{ deg}$$

Reflectividad del suelo:

$$\rho_g := 0.2$$

$$H_{\text{ad}} := H_{\text{ad}_i} \cdot \frac{\text{W} \cdot \text{hr}}{\text{m}^2}$$



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

$$Hd_i := Hd_{ad_i} \cdot \frac{W \cdot hr}{m^2}$$

Temperatura ambiente:

$$T0 := T_{0C} \cdot K + 273.15 \cdot K$$

Al igual que en el programa de ACS se introducen los valores de área, reflectividad, inclinación y orientación.

La reflectividad del suelo se aproxima al valor constate de 0.2

La orientación respecto al sur será 0

La inclinación de los captadores será optimizada de manera que en función de los resultados se elegirá la más adecuada. En este caso, el valor óptimo para la demanda se 45°

Se obtiene el valor de n, número del día del año, para cada día medio de cada mes mediante la siguiente expresión

diasmes :=

	1
1	31
2	28
3	31
4	30
5	31
6	30
7	31
8	31
9	30
10	31
11	30
12	31

$$n_i := \left( \sum_{mes=1}^i diasmes_{mes} \right) - \frac{diasmes_1}{2}$$

$$\sum_{mes=1}^{12} diasmes_{mes} = 365$$

	1
1	15.5
2	45
3	74.5
4	105
5	135.5
n = 6	166
7	196.5
8	227.5
9	258
10	288.5
11	319
12	349.5

Una vez conocido el valor de n para cada día medio de cada mes, se obtiene el valor de la declinación de la tierra para ese día.

$$\delta := \left[ 23.45 \cdot \deg \cdot \sin \left[ \frac{360 \cdot \deg}{365} \cdot (284 + n) \right] \right]$$

En función de la latitud y la declinación, se obtienen los valores del ángulo horario para plano horizontal y plano inclinado.

Angulo horario de salida y puesta del sol sobre el plano horizontal (z):

$$\omega_{sz_i} := \arccos(-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta_i))$$

Angulo horario de salida y puesta del sol sobre el plano inclinado (T):

$$\omega_{sT_i} := \arccos(-\tan(\phi - \beta) \cdot \tan(\delta_i))$$

Esta expresión sólo es aplicable cuando gamma = 0, y es la que hay que aplicar en ese caso, porque las otras no dan solución en ese caso.

$$x := \text{if} \left( \gamma = 0, 0, \frac{\cos(\phi)}{\sin(\gamma) \cdot \tan(\beta)} + \frac{\sin(\phi)}{\tan(\gamma)} \right) = 0$$

$$y_i := \text{if} \left( \gamma = 0, 0, \tan(\delta_i) \cdot \left( \frac{\sin(\phi)}{\sin(\gamma) \cdot \tan(\beta)} - \frac{\cos(\phi)}{\tan(\gamma)} \right) \right)$$

Salida del sol para el captador (plano inclinado):

$$\omega_{srT_i} := \min \left[ \omega_{sz_i}, \text{if} \left[ \gamma = 0, \omega_{sT_i}, \text{if} \left[ \gamma > 0, \arccos \left[ \frac{-x \cdot y_i - \sqrt{x^2 - (y_i)^2 + 1}}{x^2 + 1} \right], \arccos \left[ \frac{-x \cdot y_i + \sqrt{x^2 - (y_i)^2 + 1}}{x^2 + 1} \right] \right] \right] \right]$$

Puesta del sol para el captador (plano inclinado):

$$\omega_{ssT_i} := \min \left[ \omega_{sz_i}, \text{if} \left[ \gamma = 0, \omega_{sT_i}, \text{if} \left[ \gamma > 0, \arccos \left[ \frac{-x \cdot y_i + \sqrt{x^2 - (y_i)^2 + 1}}{x^2 + 1} \right], \arccos \left[ \frac{-x \cdot y_i - \sqrt{x^2 - (y_i)^2 + 1}}{x^2 + 1} \right] \right] \right] \right]$$

$$h_{sz_i} := 2 \omega_{sz_i} \cdot \frac{24 \cdot \text{hr}}{360 \cdot \deg}$$

$$h_{sT_i} := \left( \omega_{srT_i} + \omega_{ssT_i} \right) \cdot \frac{24 \cdot \text{hr}}{360 \cdot \text{deg}}$$

$$HW := \left( \frac{H}{h_{sz}} \right)$$

$$HdW := \left( \frac{Hd}{h_{sz}} \right)$$

Mediante la siguiente expresión se obtiene el valor de la radiación extraterrestre para plano horizontal.

Irradiación extraterrestre diaria:

$$G_{0n_i} := 1367 \cdot \left( 1 + 0.033 \cdot \cos \left( \frac{360 \cdot n_i}{365} \cdot \text{deg} \right) \right) \cdot \frac{W}{m^2}$$

$$H_{0_i} := 2 \cdot \frac{12 \cdot 3600 \cdot s \cdot G_{0n_i}}{\pi} \cdot \left( \cos(\phi) \cdot \cos(\delta_i) \cdot \sin(\omega_{sz_i}) + \omega_{sz_i} \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\delta_i) \right)$$

$$H_{0\beta_i} := 2 \cdot \frac{12 \cdot 3600 \cdot s \cdot G_{0n_i}}{\pi} \cdot \left( \cos(\phi - \beta) \cdot \cos(\delta_i) \cdot \sin(\omega_{ssT_i}) + \omega_{ssT_i} \cdot \sin(\phi - \beta) \cdot \sin(\delta_i) \right)$$

$$\omega_{srT_i} := -\omega_{srT_i}$$

$$H_{0\beta\gamma_i} := \frac{12 \cdot 3600 \cdot s \cdot G_{0n_i}}{\pi} \cdot \left( \sin(\delta_i) \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\beta) \cdot \left| \omega_{ssT_i} - \omega_{srT_i} \right| - \sin(\delta_i) \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\beta) \cos(\gamma) \cdot \left| \omega_{ssT_i} - \omega_{srT_i} \right| + \cos(\phi) \right)$$

Índice de transparencia atmosférica

$$k_{T_i} := \frac{H_i}{H_{0_i}}$$

Proporción de radiación difusa

Correlación de Vázquez y Santos corregida por declinación (Rodríguez 2010):

Para ser utilizada en la estimación de la fracción de radiación difusa, cuando no se dispone de datos de irradiación difusa diaria.

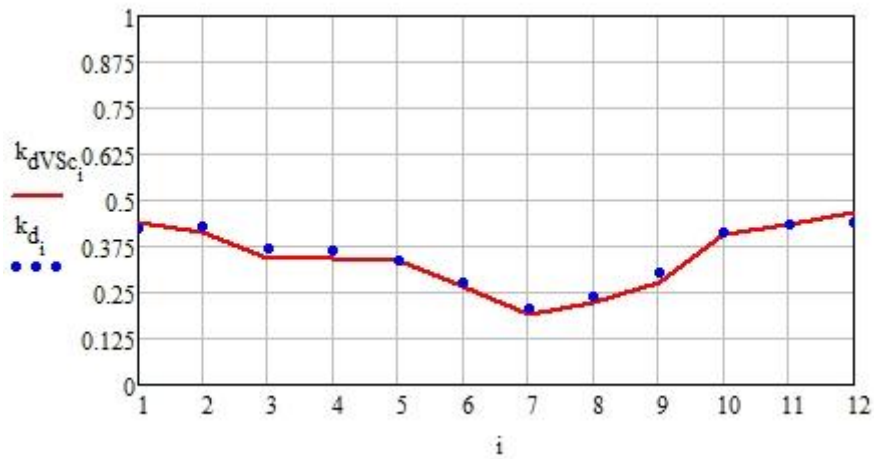
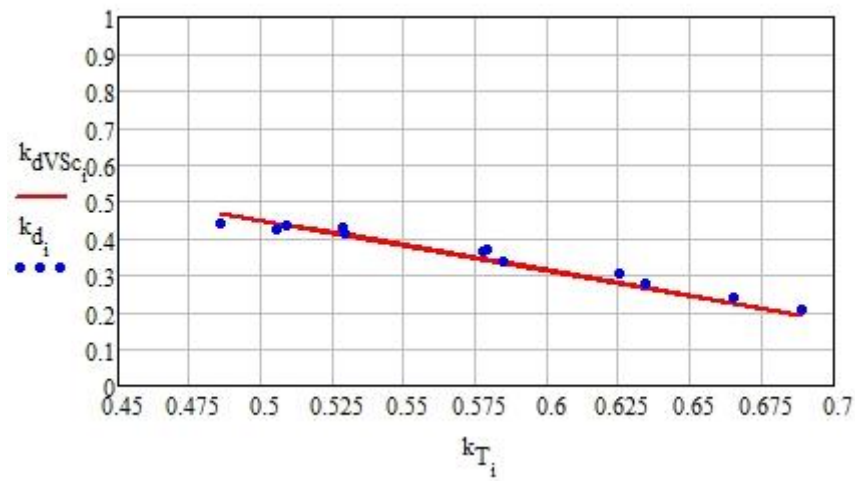
$$k_{dVSc_i} := \begin{cases} k_{T_i} & \text{if } k_{T_i} \leq 0.15 \\ \left[ (0.56 + 0.02 \cdot \delta_i)^{0.35} \cdot \left[ -0.0434526 + 1.55331 \cdot k_{T_i} - 1.82879 \cdot (k_{T_i})^2 \right] \right] & \text{if } 0.15 \leq k_{T_i} < 0.77 \\ 0.06 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{dVSc_i} := \frac{k_{dVSc_i}}{k_{T_i}}$$

Vázquez y Santos definen  $K_d$  como  $H_d/H_0$  en lugar de como hace el resto ( $H_d/H$ ).

Kd experimental:

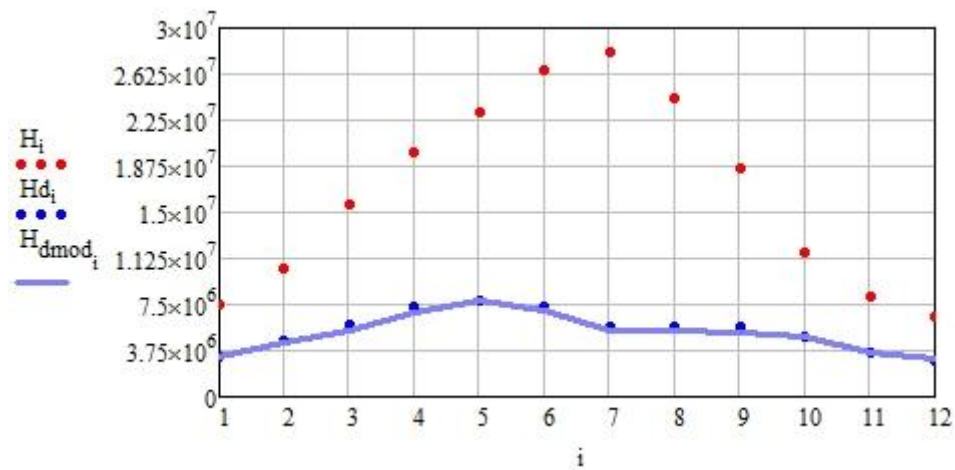
$$k_{d_i} := \frac{H_{d_i}}{H_i}$$



$$H_{dmod_i} := H_i \cdot k_{dVS}k_{T_i}$$

$$H_{bmod_i} := H_i - H_{dmod_i}$$

$$H_{b_i} := H_i - H_{d_i}$$



Como se puede comprobar, el modelo descrito y los datos de irradiación difusa son muy similares. Esto es porque se están tratando datos de la ciudad de Madrid, que es en la que se basa el modelo.

A partir de los datos anteriores, se describen los dos modelos de cielo que describirán la radiación para un plano inclinado:

**Radiación sobre plano inclinado:**

Cálculo de  $R_b$  y de los factores de forma de la superficie inclinada (captador):

$$H_{0T_i} := \text{if}(\gamma = 0, H_{0\beta_i}, H_{0\beta_i} \gamma_i)$$

$$R_{b_i} := \frac{H_{0T_i}}{H_{0_i}}$$

$$F_{c\_s} := \frac{1 + \cos(\beta)}{2} = 0.787$$

$$F_{c\_g} := \frac{1 - \cos(\beta)}{2} = 0.213$$

Modelo isotrópico:

$$H_{T\_directa_i} := H_{b_i} \cdot R_{b_i}$$

$$H_{T\_difusa\_iso_i} := H_{d_i} \cdot F_{c\_s}$$

$$H_{T\_reflejada_i} := H_i \cdot \rho_g \cdot F_{c\_g}$$

$$H_{T\_iso_i} := H_{T\_directa_i} + H_{T\_difusa\_iso_i} + H_{T\_reflejada_i}$$

Modelo anisotrópico o HDKR (Hay, Davies, Klucher & Reindl):

$$A_{i_i} := \frac{H_{b_i}}{H_{0_i}}$$

$$f_i := \sqrt{\frac{H_{b_i}}{H_i}}$$

$$H_{T\_directa_i} := H_{b_i} \cdot R_{b_i}$$

$$H_{T\_difusa\_circun_i} := H_{d_i} \cdot A_{i_i} \cdot R_{b_i}$$

$$H_{T\_difusa\_cielo_i} := H_{d_i} \cdot (1 - A_{i_i}) \cdot F_{c\_s}$$

$$H_{T\_difusa\_horizonte_i} := H_{d_i} \cdot (1 - A_{i_i}) \cdot f_i \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)^3$$

$$H_{T\_reflejada_i} := H_i \cdot \rho_g \cdot F_{c\_g}$$

$$H_{T\_aniso_i} := H_{T\_directa_i} + H_{T\_difusa\_circun_i} + H_{T\_difusa\_cielo_i} + H_{T\_difusa\_horizonte_i} + H_{T\_reflejada_i}$$

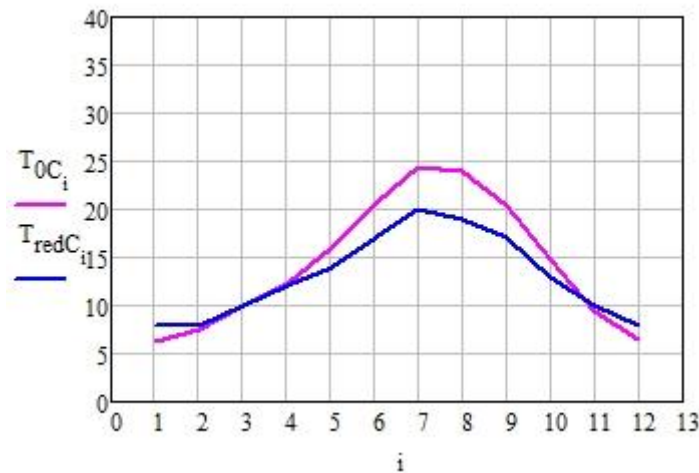
Habilitar una de las dos expresiones para elegir entre modelo isotrópico o anisotrópico.

$$HW_{T_i} := \frac{H_{T\_aniso_i}}{h_{sT_i}}$$

$$HW_{T_i} := \frac{H_{T\_iso_i}}{h_{sT_i}}$$

El modelo habilitado será el anisotrópico, ya que sin ser mucho más complejo, deja datos más próximos a la realidad.

### Datos de demanda:



Los datos introducidos aquí corresponden a los captadores seleccionados.

### Rendimiento del captador y parámetros de la instalación:

$$a_0 := 0.793$$

$$a_1 := 3.95 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$a_2 := 0.0122 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K^2}$$

La efectividad tiene un valor de 0.5 por defecto

Efectividad del IC:

$$\epsilon_{ic} := 0.5$$

La proporción de anticongelante en el fluido ya se ha obtenido antes. Sus propiedades figuran en las gráficas de los anexos.

Propiedades del, flujo primario (agua con propilenglicol al 35%):

$$cp1 := 3850 \cdot \frac{J}{kg \cdot K}$$





## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

$$\rho_1 := 1015 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Propiedades del, flujo secundario (agua pura):

$$c_{p2} := 4180 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\rho_2 := 992 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Propiedades del, flujo de consumo (agua pura):

$$c_{p\text{cons}} := 4180 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\rho_{\text{cons}} := 992 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En este caso, la potencia térmica que debemos intentar cubrir se define con la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{cons}} := \left[ m_{\text{agua\_red}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{entrada\_piscina}} - T_{\text{entrada\_agua}}) + m_{\text{recirculado}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{entrada\_piscina}} - T_{\text{salida\_piscina}}) \right]$$

El valor del grado de estratificación se asumirá constante y conocido, siendo 0.25.

Grado de estratificación del acumulador:

$$E_t := 0.25$$

Definido como:  $(T_{\text{cons}} - T_t) / (T_{\text{ico}} - T_t)$

### Valores iniciales de los parámetros variables:

Gasto másico del primario calculado en función de la superficie de captadores y la recomendación del fabricante:

$$m_1 := 60 \cdot \frac{\text{L}}{\text{hr}} \cdot \frac{1}{2.321 \cdot \text{m}^2} \cdot \rho_1 \cdot A_{\text{col}}$$

$$\text{Area\_unidad} := 2.321 \text{m}^2$$

Para ver el efecto de no poner el gasto nominal:

$$m_1 = 1.184 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$C_1 := m_1 \cdot c_{p1}$$

$$C_1 = 4.559 \times 10^3 \cdot \frac{1}{\text{K}} \cdot \text{W}$$

Gasto másico del secundario:

$$m_2 := m_1$$

$$m_2 = 1.184 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$C_2 := m_2 \cdot c_{p2}$$

$$C_2 = 4.95 \times 10^3 \cdot \frac{1}{\text{K}} \cdot \text{W}$$

$$C_{\text{min}} := \min(C_1, C_2)$$



$$C_{min} = 4.559 \times 10^3 \frac{1}{K} \cdot W$$

### Valores iniciales de las incógnitas:

Al igual que en el otro programa, los valores iniciales dados a las variables son cruciales para conseguir que Mathcad no tenga problemas de convergencia. Los datos iniciales en este caso son diferentes que en anterior.

$$T_{ci_1} := 25 \cdot K + 273.15 \cdot K$$

$$T_{ci_1} := 20 \cdot K + 273.15 \cdot K$$

$$T_{co_1} := 35 \cdot K + 273.15 \cdot K$$

$$T_{co_1} := 65 \cdot K + 273.15 \cdot K$$

$$T_{salida\_vaso_1} := 30 \cdot K + 273.15 \cdot K$$

$$T_{m_1} := \frac{T_{co_1} + T_{ci_1}}{2}$$

$$T_t := \frac{T_{co} + T_{red}}{2}$$

Fracción solar estimada:

$$f_i := 0.6$$

El sistema de ecuaciones a resolver tiene varios cambios respecto al programa de ACS, principalmente en el nombre de variables, balance en el acumulador y fracción solar.

### Sistema de ecuaciones:

Dado

$$[C1 \cdot (T_{co} - T_{ci})] = \left[ HW_T \cdot A_{col} \cdot \left[ a_0 - \frac{T_m - T_0}{HW_T} \cdot a_1 - a_2 \cdot \left( \frac{T_m - T_0}{HW_T} \right)^2 \right] \cdot HW_T \right]$$

$$[C1 \cdot (T_{co} - T_{ci})] = [C2 \cdot (T_{co} - T_{ci})]$$

$$\epsilon_{ic} = \frac{C2 \cdot (T_{co} - T_{ci})}{C_{min} \cdot (T_{co} - T_{ci})}$$

$$[C2 \cdot (T_{co} - T_{ci})] = [m_{agua\_red} \cdot c_p \cdot (T_{salida\_vaso} - T_{entrada\_agua}) + m_{recirculado} \cdot c_p \cdot (T_{salida\_vaso} - T_{salida\_piscina})]$$

$$f = \frac{C2 \cdot (T_{co} - T_{ci})}{m_{agua\_red} \cdot c_p \cdot (T_{entrada\_piscina} - T_{entrada\_agua}) + m_{recirculado} \cdot c_p \cdot (T_{entrada\_piscina} - T_{salida\_piscina})}$$

$$T_t = \frac{T_{co} \cdot m_2 + m_{recirculado} \cdot T_{salida\_piscina} + m_{agua\_red} \cdot T_{entrada\_agua}}{m_2 + m_{recirculado} + m_{agua\_red}}$$

$$T_m = \frac{(T_{co} + T_{ci})}{2}$$

$$Et = \frac{T_{salida\_vaso} - T_t}{T_{ico} - T_t}$$

$$\begin{pmatrix} \text{var1} \\ \text{var2} \\ \text{var3} \\ \text{var4} \\ \text{var5} \\ \text{var6} \\ \text{var7} \\ \text{var8} \end{pmatrix} := \text{Find}(T_{ci}, T_{ci}, T_{co}, T_{ico}, T_{salida\_vaso}, T_t, f, T_m)$$

$$T_{ci} := \text{var1}$$

$$T_{ci} := \text{var2}$$

$$T_{co} := \text{var3}$$

$$T_{ico} := \text{var4}$$

$$T_{salida\_vaso} := \text{var5}$$

$$T_m := \text{var8}$$

$$T_t := \text{var6}$$

$$f := \text{var7}$$

$$\epsilon_{ic} = 0.5$$

$$Et = 0.25$$

$$A_{col} = 162.47 \text{ m}^2$$

$$\eta_c := \left[ a_0 - \frac{T_{ci} - T_0}{HW_T} \cdot a_1 - a_2 \cdot \left( \frac{T_{ci} - T_0}{HW_T} \right)^2 \cdot HW_T \right]$$

$$Q_{col} := [C_1 \cdot (T_{co} - T_{ci})]$$

### Resultados:

La media de f no es el f anual, porque cada mes tiene una radiación distinta.

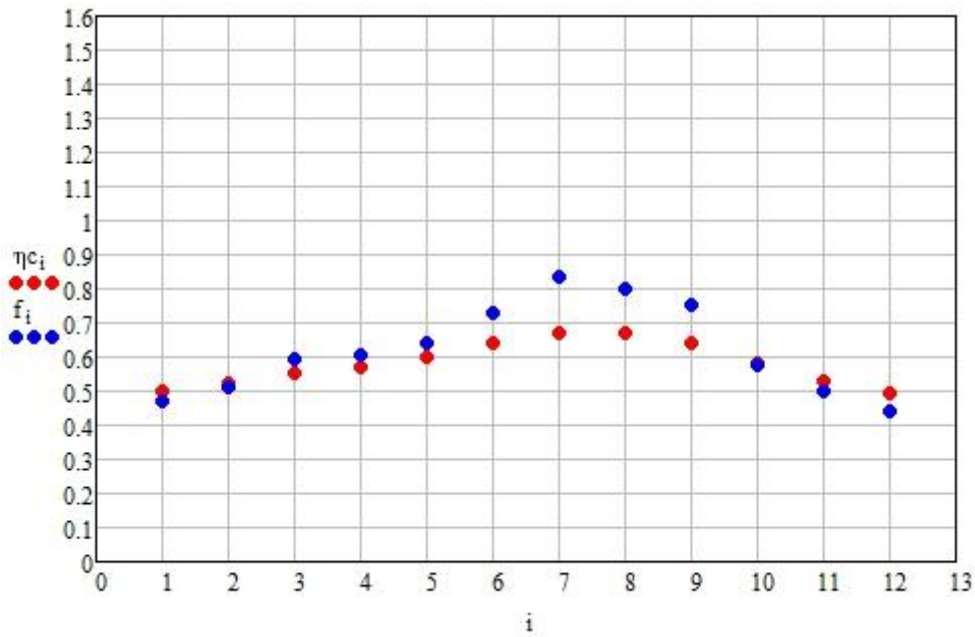
$$\text{mean}(\eta_c) = 0.582$$

$$\text{mean}(Q_{col}) = 4.23 \times 10^4 \text{ W}$$

$$\text{mean}(f) = 0.622$$

$$f_{\text{anual}} := \frac{\left[ \sum_{i=1}^{12} ((Q_{col}_i)) \right]}{\left[ \sum_{i=1}^{12} ((Q_{cons}_i)) \right]}$$

$$f_{\text{anual}} = 0.621$$



$\eta_c =$	1
	0.502
	0.521
	0.555
	0.569
	0.602
	0.643
	0.668
	0.673
	0.64
	0.584
	0.532
	0.493

Tabla 71 Valores del rendimiento a lo largo del año

$Q_{col} =$	1	W
	$3.264 \cdot 10^4$	
	$3.54 \cdot 10^4$	
	$4.066 \cdot 10^4$	
	$4.119 \cdot 10^4$	
	$4.341 \cdot 10^4$	
	$4.89 \cdot 10^4$	
	$5.519 \cdot 10^4$	
	$5.593 \cdot 10^4$	
	$5.037 \cdot 10^4$	
	$3.933 \cdot 10^4$	
	$3.449 \cdot 10^4$	
	$3.012 \cdot 10^4$	

Tabla 72 Potencia térmica suministrada por la instalación para cada día típico del mes

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

	1
1	0.473
2	0.515
3	0.593
4	0.603
5	0.64
6	0.727
7	0.836
8	0.802
9	0.752
10	0.579
11	0.502
12	0.439

f =

Tabla 73 Fracción solar cubierta

	1
1	6.904·10 <sup>4</sup>
2	6.879·10 <sup>4</sup>
3	6.854·10 <sup>4</sup>
4	6.826·10 <sup>4</sup>
5	6.782·10 <sup>4</sup>
6	6.724·10 <sup>4</sup>
7	6.601·10 <sup>4</sup>
8	6.973·10 <sup>4</sup>
9	6.702·10 <sup>4</sup>
10	6.797·10 <sup>4</sup>
11	6.871·10 <sup>4</sup>
12	6.867·10 <sup>4</sup>

Qcons =

W

Tabla 74 Potencia térmica demandada por la instalación para un día medio de cada mes

Para hablar en términos de energía obtenida en la instalación, se multiplica la potencia térmica cubierta por energía solar por el valor de horas de sol en el que se obtiene.

En este caso no hay meses en los que se supere la fracción solar a cubrir, luego no habrá energía inútil

$$\text{Energía}_{\text{inútil}} := 0$$

$$\text{Energía}_{\text{total\_producio}} := \sum_{i=1}^{12} \left( (Q_{\text{col}_i} \cdot h_s T_i) \right) = 2.045 \times 10^{10} \text{ J}$$

$$\text{Energía}_{\text{neta}} := \text{Energía}_{\text{total\_producio}} - \text{Energía}_{\text{inútil}} = 2.045 \times 10^{10} \text{ J}$$

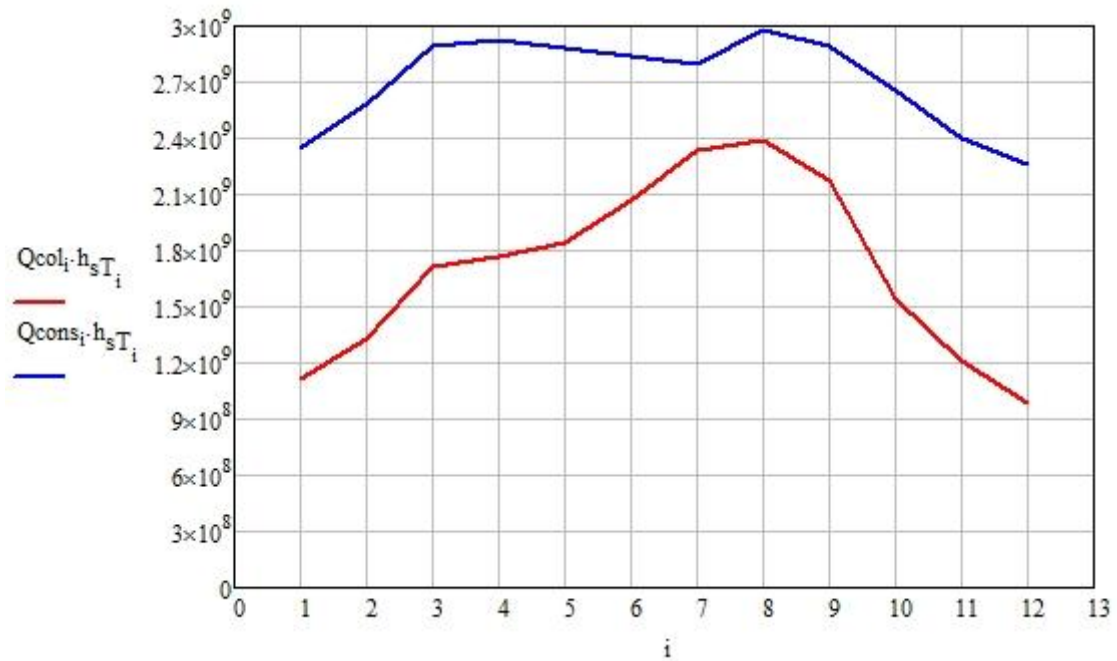


Ilustración 81 Gráfica de la energía neta producida por la instalación y la demandada

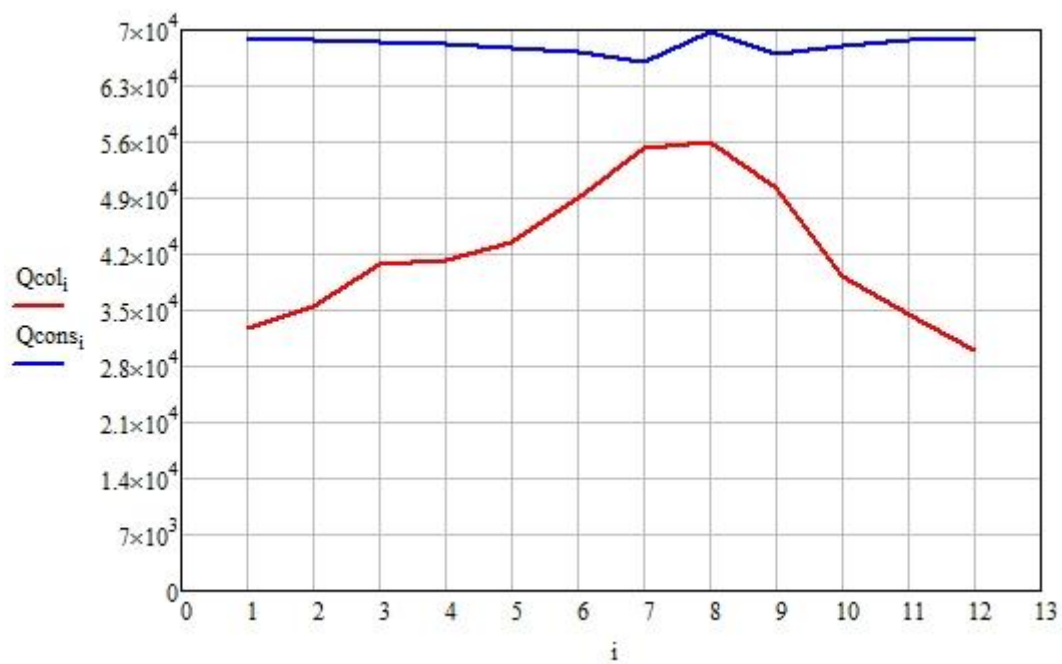


Ilustración 82 Gráfica de la potencia térmica neta producida por la instalación y la demanda

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

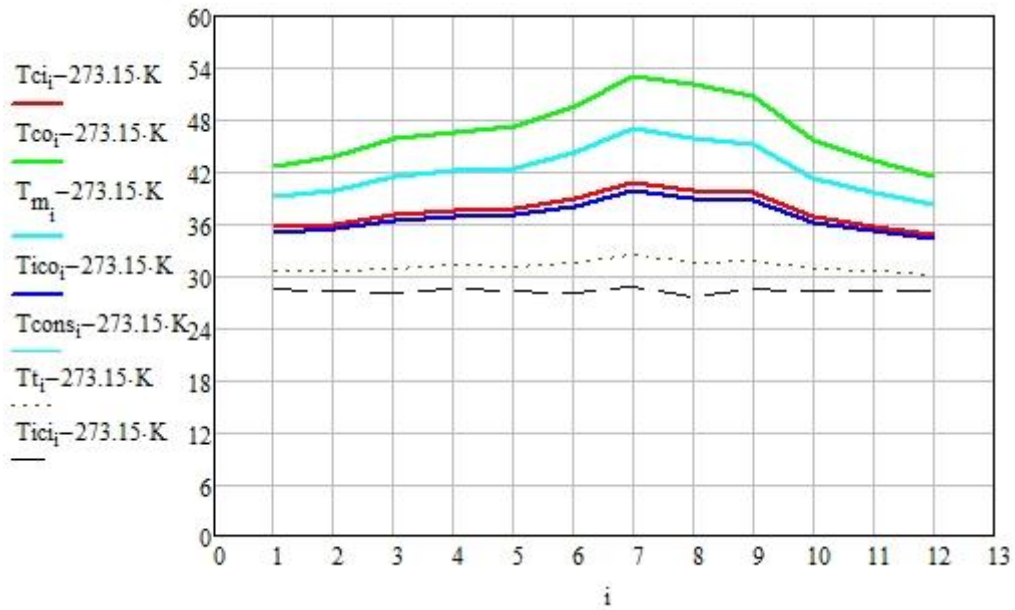


Ilustración 83 Gráfica de la evolución de las temperaturas en distintos puntos de la instalación a lo largo del año



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

### 9.1.3 Programa dimensionamiento intercambiadores

Como se había mencionado anteriormente el intercambio de calor entre el fluido del circuito primario y el secundario se realizará a través de un intercambiador de placas.

Para realizar el dimensionamiento del mismo se ha usado una hoja de cálculo de Mathcad que se detalla a continuación:

Debido a que no todos los meses la potencia a intercambiar es la misma, se decide calcular un intercambiador capaz de trabajar correctamente en las condiciones más exigentes de todo el año, que se dan en el mes de Junio. Es el mes que más potencia térmica es necesario intercambiar, luego se procede de la siguiente manera:

De la simulación del sistema de captación obteníamos se podían obtener todos los datos de temperatura y potencia térmica. Se definen estos, teniendo especial cuidado en la nomenclatura, ya que en este caso la temperatura será de fluido caliente y fluido frío, no de colectores e intercambiador, resultando:

INTERCAMBIADOR DE CALOR DE PLACAS CIRCUITO ACS.

Datos de los flujos:

$$T_{ci} := 60.306K + 273.15K \quad T_{ci} = 333.456K$$

$$T_{co} := 64.747K + 273.15K \quad T_{co} = 337.897K$$

$$T_{ho} := 65.127K + 273.15K \quad T_{ho} = 338.277K$$

$$T_{hi} := 69.949K + 273.15K \quad T_{hi} = 343.099K$$

Por simplicidad se asumen gastos máscicos idénticos de ambos fluidos

$$m_h := 3.02 \frac{kg}{s} \quad m_c := m_h = 3.02 \frac{kg}{s}$$

Se asume un valor estándar de la resistencia de ensuciamiento

Coefficiente de resistencia de ensuciamiento:

$$R_{sf} := 3 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Datos de las placas:

Las placas están formadas por Acero AISI 316

$$k_{inox} := 13.4 \frac{W}{m \cdot K} \quad e_p := 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot m \quad \text{Espesor de las placas}$$

Propiedades de ambos fluidos obtenidas de tablas, para unos valores medios de 55°C

Propiedades de los fluidos:



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

$$\begin{aligned} c_{pc} &:= 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} & \rho_c &:= 992 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} & \mu_c &:= 692 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s} \\ P_{rc} &:= \frac{\mu_c \cdot c_{pc}}{k_c} & P_{rc} &= 4.599 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{ph} &:= 3850 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} & \rho_h &:= 1015 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} & \nu_h &:= 1.2 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}} \\ P_{rh} &:= \frac{\rho_h \cdot \nu_h \cdot c_{ph}}{k_h} = 9.977 & \mu_h &:= \nu_h \cdot \rho_h = 1.218 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \end{aligned}$$

Potencia térmica máxima a transmitir, dada en el mes de Junio.

$$q_h := m_h \cdot c_{ph} \cdot (T_{hi} - T_{ho}) = 5.607 \times 10^4 \text{ W}$$

Parámetros geométricos del intercambiador:

$$\begin{aligned} V_h &:= \frac{m_h}{\rho_h} & V_h &= 1.071 \times 10^4 \text{ L} \cdot \frac{1}{\text{hr}} & V_c &:= \frac{m_c}{\rho_c} \\ L &:= 0.553 \text{ m} & w &:= 0.150 \text{ m} \\ b &:= 3 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m} - e_p & b &= 2.5 \times 10^{-3} \text{ m} & l_c &:= 2 \cdot b & l_c &= 5 \times 10^{-3} \text{ m} \\ V_{\text{canal}} &:= w \cdot L \cdot b = 0.207 \text{ L} & A_{\text{placa}} &:= w \cdot L & A_{\text{placa}} &= 0.083 \text{ m}^2 \\ A_{\text{canal}} &:= b \cdot w & A_{\text{canal}} &= 3.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \\ P_{\text{canal}} &:= 2 \cdot (b + w) & P_{\text{canal}} &= 0.364 \text{ m} \\ A(n) &:= A_{\text{placa}} \cdot n \end{aligned}$$





## TRABAJO DE FIN DE GRADO

### Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

Todos los parámetros que se introduzcan de aquí en adelante lo harán en función del número de placas. Luego se igualará la resta de los valores de resistencia térmica y cociente de potencia entre diferencia media logarítmica de temperaturas, calculados por separada, dando valores entre uno y cien al número de placas. Con ello se hallará la solución al sistema de ecuaciones. Después se presentan los datos finales de resistencia y pérdida de carga, además de la comprobación.

Determinación de los coeficientes de flujo convectivo de calor, en función del número de placas útiles (n). El número de canales es n+1 y el de placas n+2.

Se supone que el número de canales es par, y que cada flujo utiliza la mitad de ellos.

Se supone a priori flujo turbulento en ambos lados. Hace falta para ello que  $Re > 10$ .

- Lado caliente:

$$mh_{canal}(n) := \frac{mh}{\frac{n+1}{2}} \quad Reh(n) := \frac{2 \cdot mh_{canal}(n)}{\mu_h \cdot (b + w)}$$

$$Nuh(n) := 0.4 Pr_h^{0.4} \cdot Reh(n)^{0.64} \quad hh(n) := \frac{Nuh(n) \cdot k_h}{l_c}$$

- Lado frío:

$$mccanal(n) := \frac{mc}{\frac{n+1}{2}} \quad Rec(n) := \frac{2 \cdot mccanal(n)}{\mu_c \cdot (b + w)}$$

$$Nuc(n) := 0.4 Pr_c^{0.4} \cdot Rec(n)^{0.64} \quad hc(n) := \frac{Nuc(n) \cdot k_c}{l_c}$$

Cálculo de la resistencia térmica total:

$$R_{tt}(n) := \frac{1}{hh(n) \cdot A(n)} + \frac{ep}{k_{inox} A(n)} + \frac{1}{hc(n) \cdot A(n)} + \frac{R_{sf}}{A(n)}$$

Diferencia media logarítmica de temperatura (suponiendo  $F=1$  por ser intercambio en contracorriente):

$$\Delta T_1 := T_{hi} - T_{cc} \quad \Delta T_1 = 5.056K \quad \Delta T_2 := T_{ho} - T_c \quad \Delta T_2 = 4.687K$$

$$\Delta T_{lm} := \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad F := 1 \quad \Delta T_m := \Delta T_{lm} \cdot F \quad \Delta T_m = 4.869K$$

Cálculo del valor de UA (o bien de  $1/R_{tt}(n)$ ):

$$\frac{\Delta T_m}{q_h} = 8.937 \times 10^{-5} K \cdot \frac{1}{W}$$

$$\frac{q_h}{\Delta T_m} = 1.119 \times 10^4 \frac{1}{K} \cdot W$$

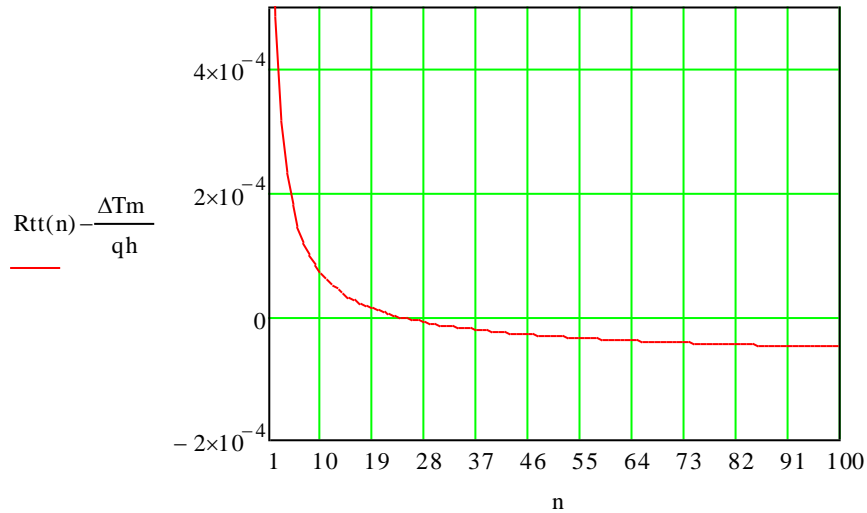


## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

Número de placas:

$$n := 1..100$$



El valor donde convergen ambos sistemas es en el 0

$$n := 30$$

$$n_{\text{placasutiles}} := \text{root} \left[ \left( R_{tt}(n) - \frac{\Delta T_m}{q_h} \right), n \right]$$

$$n_{\text{placasutiles}} = 23.572 \quad n_{\text{placasutiles}} := 25 \quad n_{\text{placastotales}} := n_{\text{placasutiles}} + 2$$

$$n_{\text{canales}} := n_{\text{placasutiles}} + 1 \quad n_{\text{placastotales}} = 27$$

$$n_{\text{canales}} = 26$$

(Se toman 25 placas útiles para que el número de canales sea par)

Cálculo de resistencias térmicas:

$$n := n_{\text{placasutiles}} \quad R_{tt}(n) = 8.934 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \frac{1}{\text{W}} \quad \frac{1}{R_{tt}(n)} = 1.119 \times 10^4 \frac{1}{\text{K}} \cdot \text{W}$$

$$R_{thh}(n) := \frac{1}{h_h(n) \cdot A(n)} \quad R_{thh}(n) = 3.476 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \frac{1}{\text{W}}$$

$$R_{tc}(n) := \frac{e_p}{k_{ino} \cdot A(n)} \quad R_{tc}(n) = 1.659 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \frac{1}{\text{W}}$$

$$R_{thc}(n) := \frac{1}{h_{c(n)} \cdot A(n)}$$

$$R_{thc}(n) = 2.466 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \frac{1}{\text{W}}$$

$$R_{tf}(n) := \frac{R_{sf}}{A(n)}$$

$$R_{tf}(n) = 1.334 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \frac{1}{\text{W}}$$

$$U(n) := \frac{1}{R_{tt}(n) \cdot A(n)}$$

$$U(n) = 4.977 \times 10^3 \frac{1}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot \text{W}$$

$$A(n) = 2.249 \text{ m}^2$$

$$U(n) \cdot A(n) = 1.119 \times 10^4 \frac{1}{\text{K}} \cdot \text{W}$$

Cálculo de pérdidas de carga en el intercambiador:

Para los coeficientes a utilizar en la ecuación de pérdidas de carga recurrimos a la tabla:

$$Re_h(n) = 1.514 \times 10^3$$

$$Re_c(n) = 2.664 \times 10^3$$

	C	m
$Re_e < 10$	17	-1
$10 < Re_e < 101$	6.29	-0.57
$101 < Re_e < 855$	1.141	-0.2
$Re_e > 855$	0.581	-0.1

Tabla 75 Valores de C y m para la correlación de la pérdida de carga en el intercambiador de placas. Referencia [13]

$$C := 0.581$$

$$m := -0.1$$

$$C_{fh} := C \cdot Re_h(n)^m$$

$$C_{fh} = 0.266$$

$$C_{fc} := C \cdot Re_c(n)^m$$

$$C_{fc} = 0.251$$

$$v_h := \frac{m_{hcanal}(n)}{\rho_h \cdot A_{canal}}$$

$$v_h = 0.61 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_c := \frac{m_{ccanal}(n)}{\rho_c \cdot A_{canal}}$$

$$v_c = 0.624 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Delta P_h := 4 \cdot C_{fh} \cdot \frac{L}{l_c} \cdot \frac{\rho_h \cdot (v_h)^2}{2}$$

$$\Delta P_c := 4 \cdot C_{fc} \cdot \frac{L}{l_c} \cdot \frac{\rho_c \cdot (v_c)^2}{2}$$

$$\Delta P_h = 2.222 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_c = 2.149 \times 10^4 \text{ Pa}$$

Usando la ecuación de pérdidas de carga para este tipo de intercambiador, se obtiene los resultados anteriores.

La pérdida de carga de diseño en el intercambiador de calor no será superior a 3 m c.a., tanto en el circuito primario como en el secundario. Se comprueba que se cumple.

### 9.1.4 Programa dimensionamiento pérdidas de carga en tuberías

A lo largo de las tuberías, debido a la rugosidad de las mismas, se producen pérdidas de energía mecánica o caídas de presión. A este tipo de pérdida se le denomina primaria.

Además, debido a que las tuberías presentan curvas, desviaciones de flujos y elementos de control del caudal como pueden ser válvulas, se producen pérdidas de energía extra, a las que se denominan secundarias.

El total de pérdidas de carga será la suma de ambas, siendo frecuente que las pérdidas secundarias tengan un valor inferior a las primarias a lo largo de todos los tramos del circuito.

Estos conceptos quedan mejor explicados durante la resolución del ejemplo.

### PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERIAS

Para calcular la velocidad de circulación del fluido a través de una tubería aplicamos la definición del caudal másico.

$$\dot{m}_1 = \rho_1 \cdot \left[ \frac{\pi \cdot (D_1)^2}{4} \right] \cdot v_1$$

Ecuación 6 Definición de caudal másico

Se introducen los datos relativos al fluido circuito, tanto el caudal como las propiedades del fluido que circula por el interior.

#### Datos

$$\dot{m}_1 := \frac{3.02 \cdot \text{kg}}{3 \cdot \text{s}}$$

Los valores de diámetro están normalizados. Si al concluir el diseño se observa que las dimensiones establecidas no cumplen con la normativa, se cambia su valor y se vuelve a calcular para un diámetro mayor, hasta conseguir el mínimo que cumpla.

$$D_{\text{nominal}} := 42 \text{ mm}$$

$$e := 1 \text{ mm}$$

$$\rho_1 := 1015 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$D_{\text{interior}} := D_{\text{nominal}} - 2 \cdot e = 0.04 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{\text{cobre}} := 0.0015 \cdot \text{mm}$$

$$f_{\text{relativa}} := \frac{\varepsilon_{\text{cobre}}}{D_{\text{interior}}} = 3.75 \times 10^{-5}$$

$$nu_1 := 1.2 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

$$\mu_1 := \nu_1 \cdot \rho_1 = 1.218 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

Cálculo de la velocidad del fluido

Valor comprendido entre 0.3 m/s y 2 m/s para tuberías dentro de local y hasta 3 m/s para tuberías fuera de local

$$v := \frac{4 \cdot m_1}{\rho_1 \cdot \pi \cdot (D_{\text{interior}})^2} = 0.789 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Cálculo del número de Reynolds

$$Re := \frac{(\rho_1 \cdot v \cdot D_{\text{interior}})}{\mu_1} = 2.631 \times 10^4$$

Ecuación 7 Número de Reynolds

Para continuar el programa, es necesario hacer uso el diagrama de Moody para los valores de rugosidad relativa y Reynolds obtenidos:

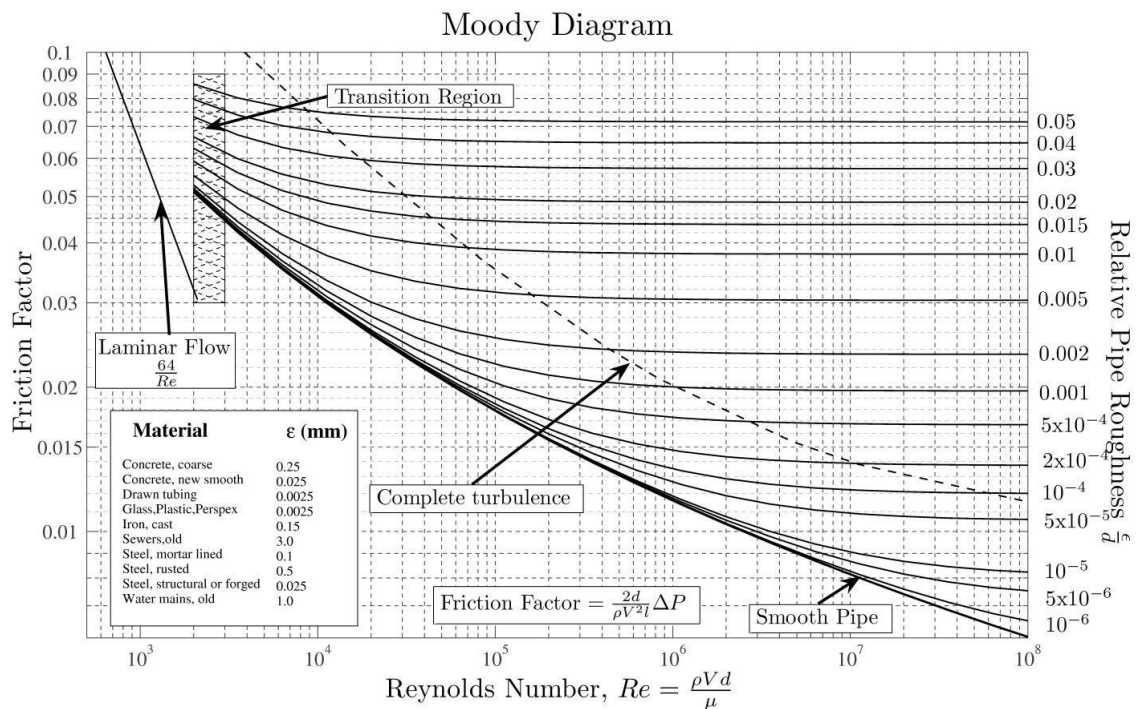


Ilustración 84 Diagrama de Moody. Referencia [15]

En este caso, el valor obtenido del diagrama está próximo a 0.024. Se introduce

$$f := 0.024$$

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

Se comprueba el resultado iterando en la correlación de Colebrook- White

$$f := \left[ \frac{1}{-2 \cdot \log \left( \frac{2.51}{Re \cdot f^{0.5}} + \frac{f_{relativa}}{3.7} \right)} \right]^2 = 0.024$$

Ecuación 8 Correlación de Colebrook - White

El valor vuelve a estar próximo al utilizado, así que lo introducimos de nuevo para obtener un valor más preciso, de esta manera, con una simple iteración se obtiene el factor de fricción.

$$f \cdot 10^3 = 24.362$$

La ecuación de Bernoulli para flujo en conductos, simplificada acaba dando la expresión de las pérdidas de carga.

Ecuación de pérdidas de carga

$$\Delta p := \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \left( \frac{L_{tuberia}}{D_{interior}} \cdot f + K_{perdidas} \right)$$

Ecuación 9 Pérdidas de carga para flujo en conductos

Como se aprecia, la ecuación tiene dos términos, el primero que hace referencia a las pérdidas principales y el segundo a las secundarias.

El factor K se puede introducir también como una longitud equivalente, que sumada a la longitud total, nos da las pérdidas de carga totales de la instalación.

Estas longitudes equivalentes cambiarán en función del diámetro de la tubería.

Diámetro Tubería (mm)	Válvula de retención	Codo a 90°	T	Válvula de esfera
12	1.2	0.37	0.53	0.15
18	1.8	0.48	0.67	0.21
22	2.4	0.61	0.9	0.27
28	3.6	0.79	1.1	0.3
32	3.7	0.84	2.4	0.36
40	4.7	0.96	3	0.44
50	5.7	1.27	3.6	0.55
65	6.9	1.48	4.2	0.69

Ilustración 85 Longitudes equivalentes de válvulas para diferentes diámetros. Referencia [2]

Para el presente tramo, la longitud total es:

$$L_{tuberia} := (1.056 \cdot 6m + 1m + 0.8m) \cdot 7 + (1.056 \cdot 6m + 1m + 0.8m) \cdot 6 = \quad$$

$$L_{\text{tubería}} := 106\text{m}$$

Las pérdidas secundarias pueden ponerse en términos de longitud equivalente

$$L_{\text{codo\_T}} := 3\text{m}$$

$$N_{\text{codo\_T}} := 9$$

$$L_{\text{codo\_90}} := 0.96\text{m}$$

$$N_{\text{codo\_90}} := 3$$

$$L_{\text{antirretorno}} := 4.7\text{m}$$

$$N_{\text{antirretorno}} := 0$$

$$L_{\text{esfera}} := 0.44\text{m}$$

$$N_{\text{esfera}} := 2$$

$$L_{\text{equivalente}} := L_{\text{codo\_T}} \cdot N_{\text{codo\_T}} + L_{\text{codo\_90}} \cdot N_{\text{codo\_90}} + L_{\text{antirretorno}} \cdot N_{\text{antirretorno}} + L_{\text{esfera}} \cdot N_{\text{esfera}} = 30.76\text{m}$$

Resultados:

Pérdidas primarias

$$\Delta p_{\text{primarias}} := \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \left( \frac{L_{\text{tubería}}}{D_{\text{interior}}} \cdot f \right) = 2.041 \times 10^4 \text{ Pa}$$

Ecuación 10 Pérdidas primarias

En mm.c.a por metro de tubería, tiene que ser menor a 40

$$\Delta p_{\text{primarias\_mmca}} := \frac{\left( \Delta p_{\text{primarias}} \cdot 0.102 \cdot \frac{1}{\text{Pa}} \right)}{L_{\text{tubería}}} = 19.638 \frac{1}{\text{m}}$$

En altura

$$\Delta h_{\text{primarias}} := \frac{\Delta p_{\text{primarias}}}{\rho \cdot g} = 2.05 \text{ m}$$

Pérdidas secundarias

$$\Delta p_{\text{secundarias}} := \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \left( \frac{L_{\text{equivalente}}}{D_{\text{interior}}} \cdot f \right) = 5.753 \times 10^3 \text{ Pa}$$

En altura

$$\Delta h_{\text{secundarias}} := \frac{\Delta p_{\text{secundarias}}}{\rho \cdot g} = 0.578 \text{ m}$$

Pérdidas totales en el tramo:

Total pérdidas

$$\Delta p_{\text{tramo}} := \Delta p_{\text{primarias}} + \Delta p_{\text{secundarias}} = 2.616 \times 10^4 \text{ Pa}$$

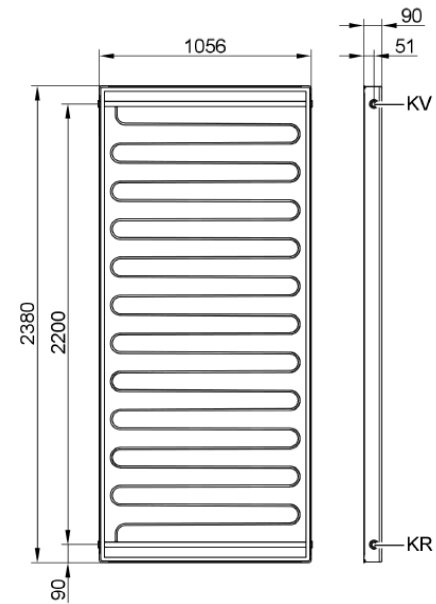
$$\Delta h_{\text{total}} := \Delta h_{\text{primarias}} + \Delta h_{\text{secundarias}} = 2.628 \text{ m}$$

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

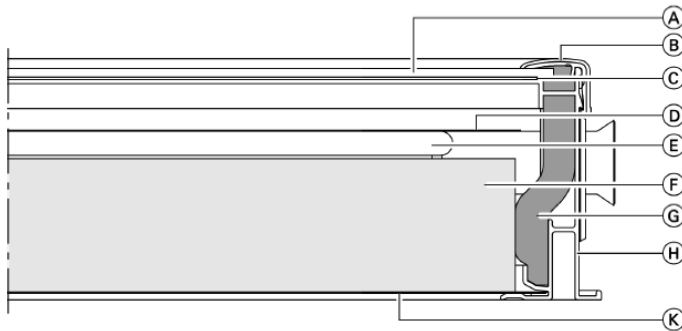
Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

### 9.2 Documentación técnica de los elementos de la instalación

#### 9.2.1 Documentación técnica de los captadores planos



Typo SV2



- (A) Solar glass cover, 3.2 mm
- (B) Aluminium cover strip
- (C) Pane seal
- (D) Copper absorber
- (E) Meander-shaped copper pipe

- (F) Mineral fibre insulation mat
- (G) Melamine epoxy foam insulation
- (H) Aluminium frame in RAL 8019
- (K) Back panel made from aluminium-zinc coated sheet steel



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

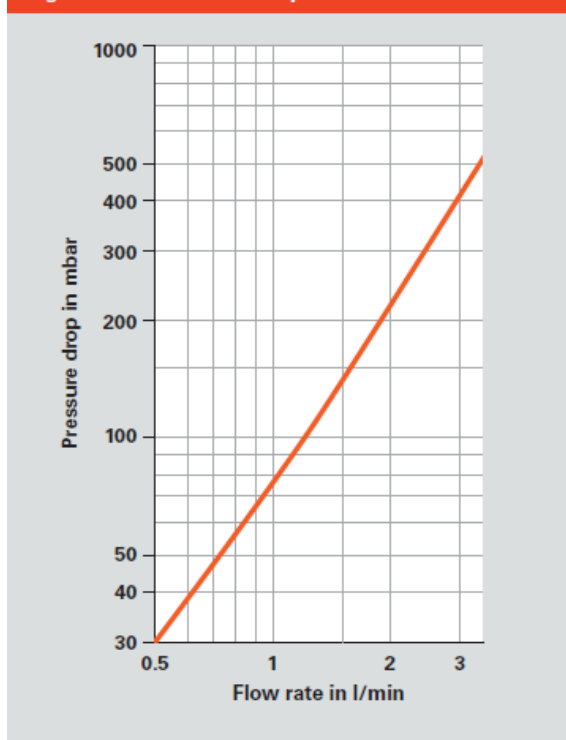
Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

### Specification, Vitosol 200-F, type SV2 and SH2

#### Specification

Type		SV2	SH2
Gross area <sup>*1</sup>	m <sup>2</sup>	2.51	2.51
Absorber area	m <sup>2</sup>	2.32	2.32
Aperture area <sup>*2</sup>	m <sup>2</sup>	2.33	2.33
Dimensions			
Width	mm	1056	2380
Height	mm	2380	1056
Depth	mm	90	90
Optical efficiency <sup>*3</sup>	%	79.3	79.3
Heat loss coefficient $k_1$ <sup>*3</sup>	W/(m <sup>2</sup> · K)	3.95	3.95
Heat loss coefficient $k_2$ <sup>*3</sup>	W/(m <sup>2</sup> · K <sup>2</sup> )	0.0122	0.0122
Thermal capacity	kJ/(m <sup>2</sup> · K)	6.4	6.4
Weight	kg	52	52
Liquid content (heat transfer medium)	litre	1.83	2.48
Permissible operating pressure <sup>*4</sup>	bar	6	6
Max. idle temperature <sup>*5</sup>	°C	221	221
Connection	Ø mm	22	22
Requirements of base structure and fixings	Roof construction with sufficient load-bearing capacity for the prevailing wind forces		

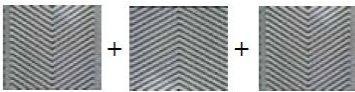
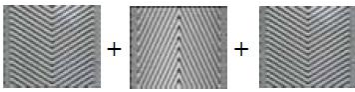
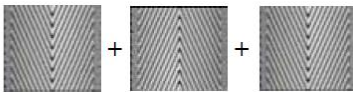
Fig. B.3.1-4 Pressure drop Vitosol 200-F



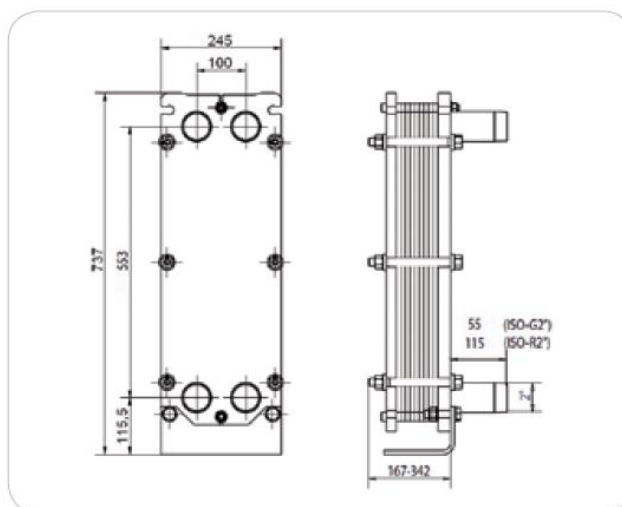
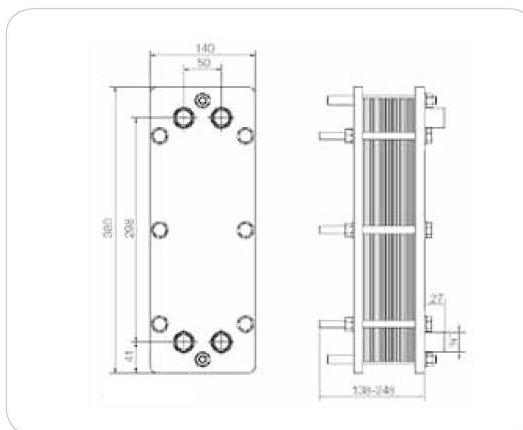
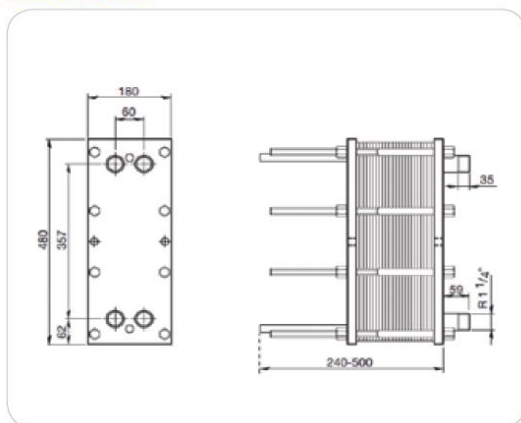
## 9.2.2 Documentación técnica de los intercambiadores

Modelos M3, T2B y TBL5



PLACA H	PLACA M (H+L)	PLACA L
		

### DIMENSIONES

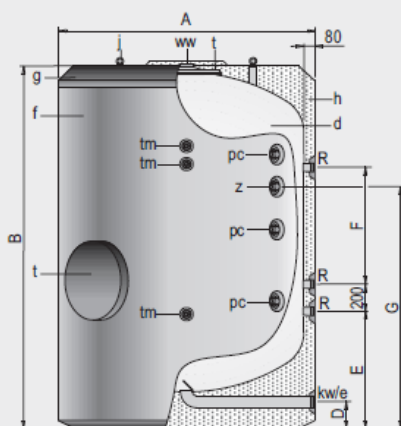


### 9.2.3 Documentación técnica de los acumuladores

#### Depósitos de acero vitrificado, de 1500 a 5000 litros

**lapesa**

#### Para acumulación



- d - Depósito acumulador A.C.S.
- f - Forro externo (opcional)
- g - Cubierta superior (opcional)
- h - Aislamiento térmico
- j - Cáncamos para transporte
- t - Boca de hombre DN400

#### Descripción

Depósitos de gran capacidad para acumulación de agua caliente sanitaria. Fabricados en acero vitrificado s/DIN 4753, con capacidades de 1500 a 5000 litros.

Aislados térmicamente con espuma rígida de poliuretano inyectada en molde, libre de CFC.

Todos los modelos disponen de conexiones para la incorporación de resistencias eléctricas de calentamiento como sistema principal de producción de ACS, o como sistema de apoyo.

Incorporan de serie equipo de protección catódica permanente "Lapasa Correx-up" (ver pag. 36).

Características técnicas /Conexiones /Dimensiones		MVV1500RB	MVV2000RB	MVV2500RB	MVV3000RB	MVV3500RB	MVV4000RB	MVV5000RB
Capacidad de A.C.S.	l	1500	2000	2500	3000	3500	4000	5000
Temperatura máx. en continuo depósito de A.C.S.	°C	90	90	90	90	90	90	90
Presión máx. depósito de A.C.S. (*)	bar	8	8	8	8	8	8	8
Peso en vacío aprox.	Kg	390	450	630	690	755	880	1040
Cota A: diámetro exterior	mm	1360	1360	1660	1660	1660	1910	1910
Cota B: longitud total	mm	1830	2280	2015	2305	2580	2310	2710
Cota D:	mm	175	175	200	200	200	200	200
Cota E:	mm	685	685	805	805	805	875	875
Cota F:	mm	330	780	300	590	875	465	870
Cota G:	mm	1115	1560	1250	1540	1755	1450	1805
kw/e: entrada agua fría/ desagüe	*GAS/M	2	2	3	3	3	3	3
ww: salida agua caliente	*GAS/M	2	2	3	3	3	3	3
z: recirculación	*GAS/M	1-1/2	1-1/2	1-1/2	1-1/2	1-1/2	1-1/2	1-1/2
R: conexión resistencia	*GAS/M	2	2	2	2	2	2	2
tm: conexión sensores laterales	*GAS/M	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4
pc: conexión protección catódica	*GAS/M	1-1/2	1-1/2	1-1/2	1-1/2	1-1/2	1-1/2	1-1/2
nº de conexiones de protección catódica	und.	2	2	3	3	3	3	3

HOT/F-RF 5000 L

AE/2

6.718,71

### 9.2.4 Documentación técnica del fluido calo portador

Las tablas que se han usado para obtener las propiedades del fluido están obtenidas directamente de la página web del fabricante TYFOCOLOR.

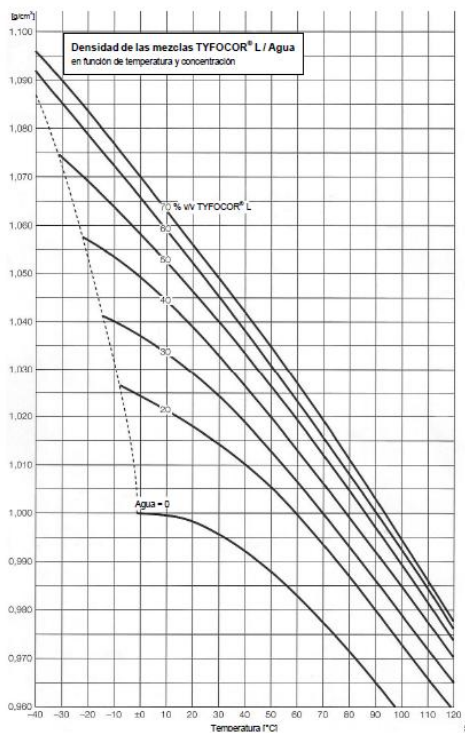


Ilustración 86 Variación de la densidad con la proporción de Agua y temperatura

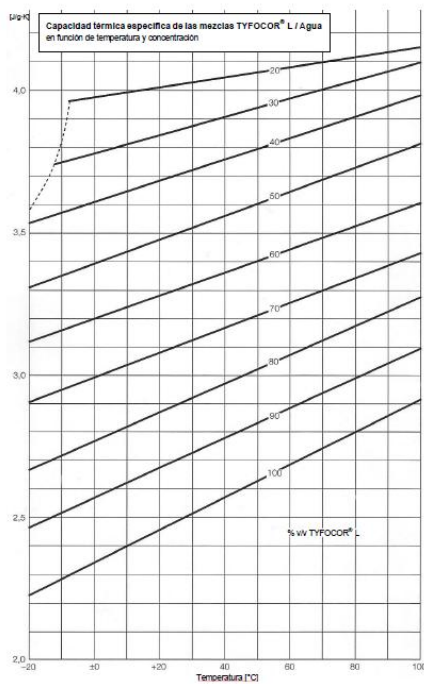


Ilustración 87 Variación de la capacidad térmica específica con la proporción de Agua y temperatura

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

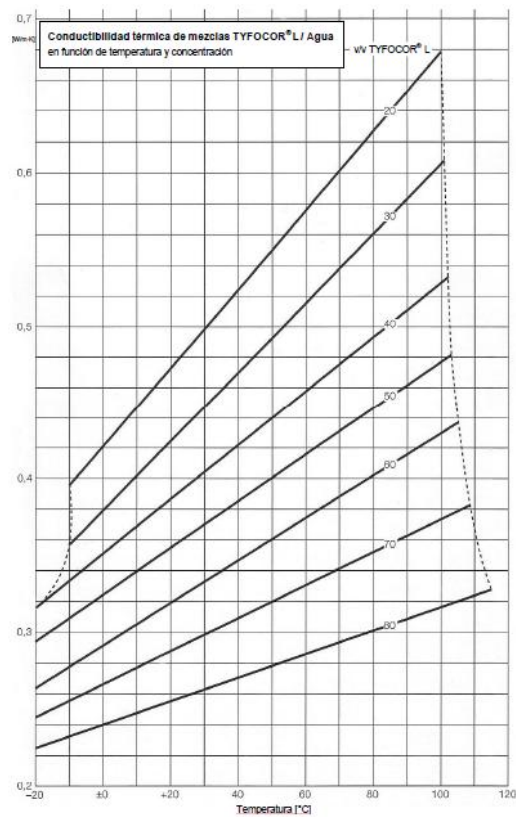


Ilustración 88 Variación de la conductividad térmica con la proporción de Agua y temperatura

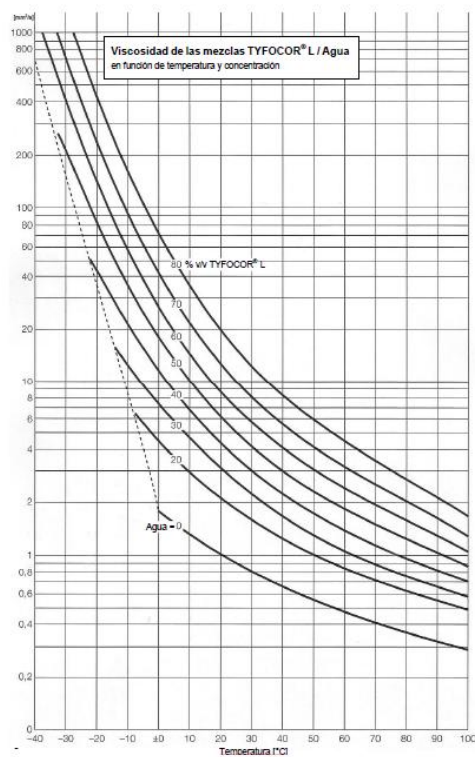

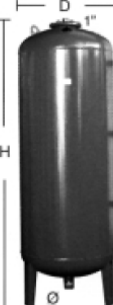


Ilustración 89 Variación de la viscosidad cinemática con la proporción de Agua y temperatura

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

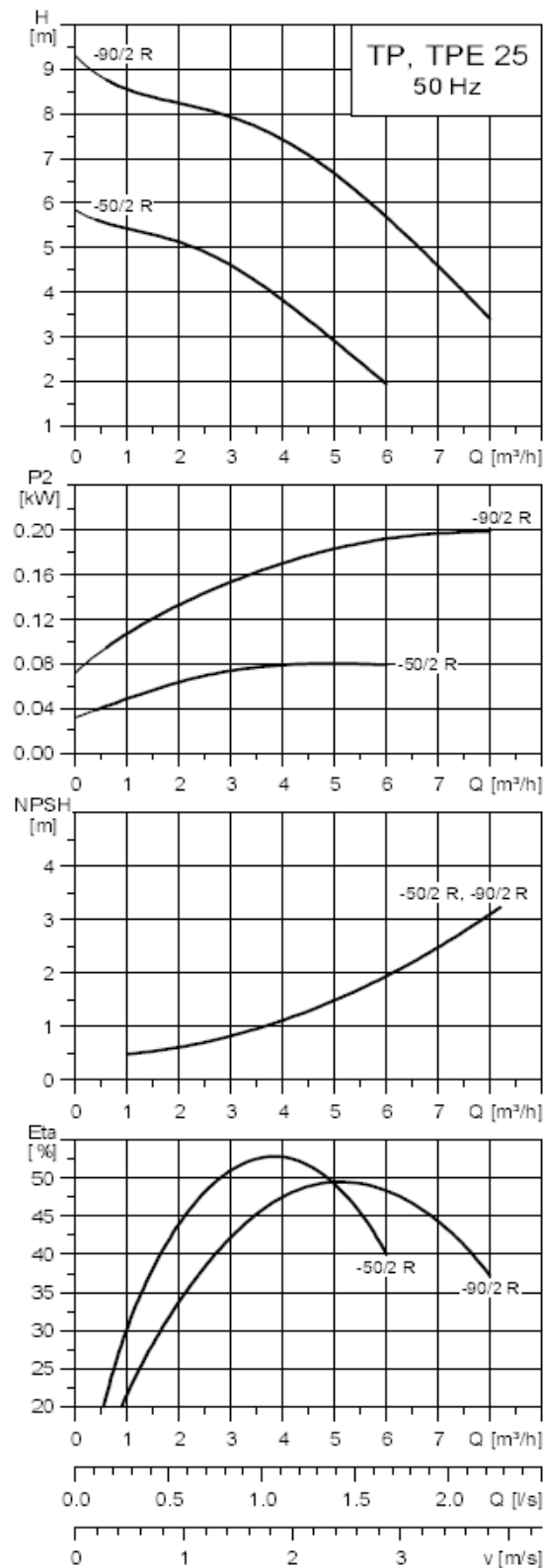
### 9.2.5 Documentación técnica de los vasos de expansión

	Código	Artículo	Capacidad lts.	Presión máx. trabajo	Presión precarga bar	D mm	H mm	H1 mm	Conexión de agua Ø DIN 259
	AC 04 001	<b>5 AMR-E</b>	5	10	1,5	200	265	—	3/4"
	AC 04 008	<b>5 AMR-E</b>	5	10	1,5	200	265	—	1"
	AC 04 005	<b>24 AMR-E</b>	24	8	1,5	350	410	—	3/4"
	AA 15 205	<b>24 AMR-E</b>	24	8	1,5	350	410	—	1"
	AA 15 227	<b>100 AMR</b>	100	16	1,5	485	805	—	1-1/2"
	AC 04 029	<b>150 AMR</b>	150	10	1,5	485	1.155	—	1-1/2"
	AC 04 030	<b>220 AMR</b>	220	10	1,5	485	1.405	—	1-1/2"
	AC 04 033	<b>350 AMR</b>	350	10	1,5	485	1.980	—	1-1/2"
	AC 04 031	<b>500 AMR</b>	500	10	1,5	600	2.065	—	1-1/2"
	AC 04 032	<b>700 AMR</b>	700	10	1,5	700	2.085	—	1-1/2"
	AC 04 027	<b>1000 AMR</b>	1000	10	1,5	850	2.225	—	2"
	AC 04 028	<b>1400 AMR</b>	1400	10	1,5	1000	2.320	—	2"

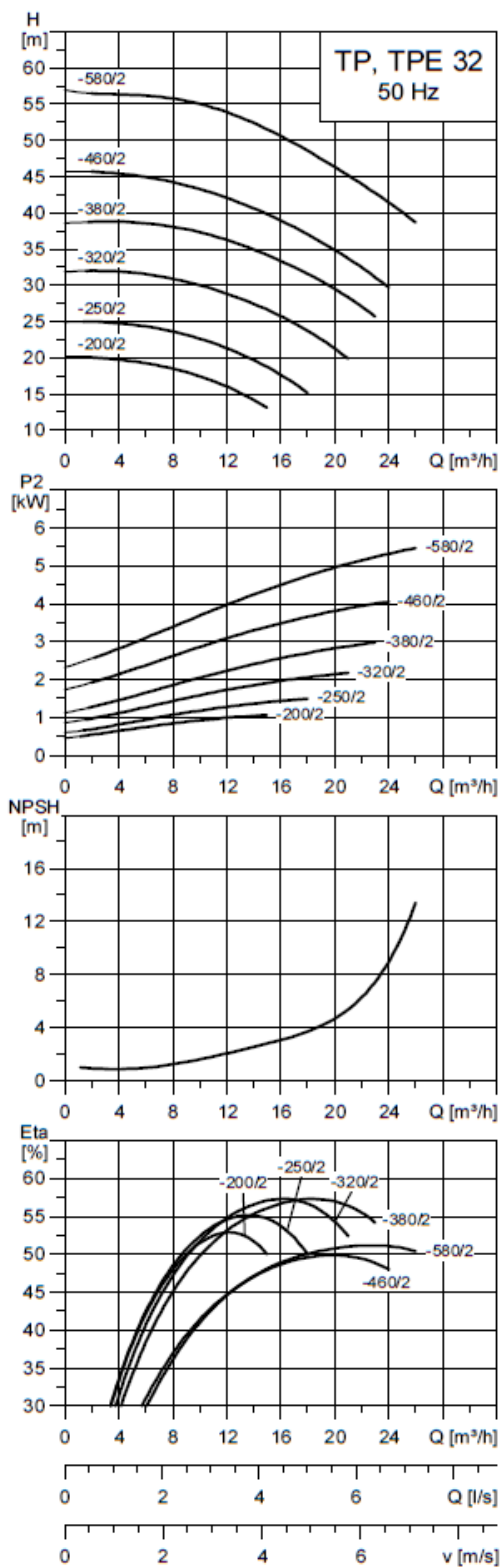
## 9.2.6 Documentación técnica de las bombas de circulación

Graficas de las bombas:

TP 25-50R secundario piscina







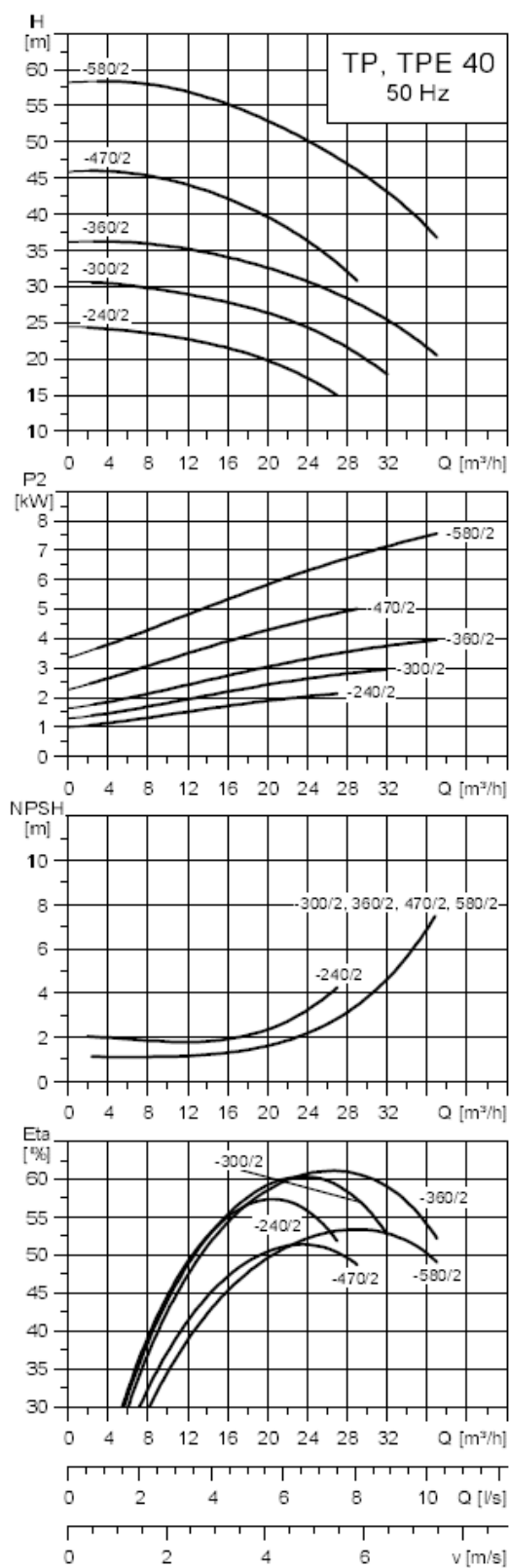


## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

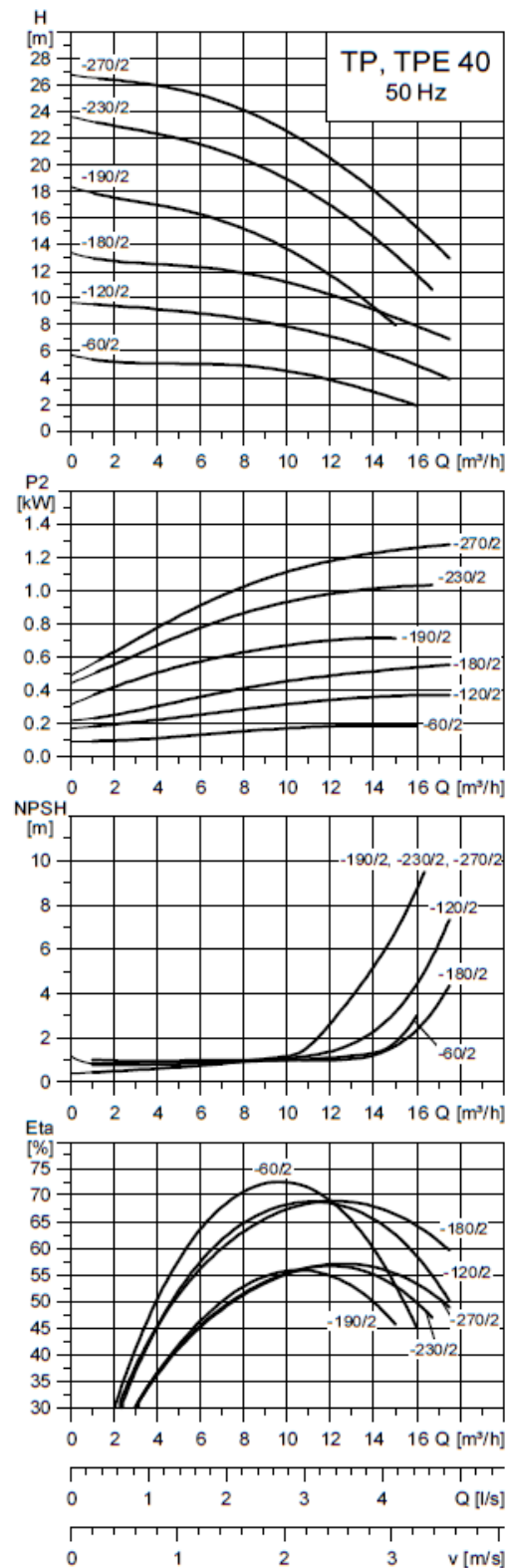
Bomba primario ACS

TP 40-360



Bomba secundario ACS

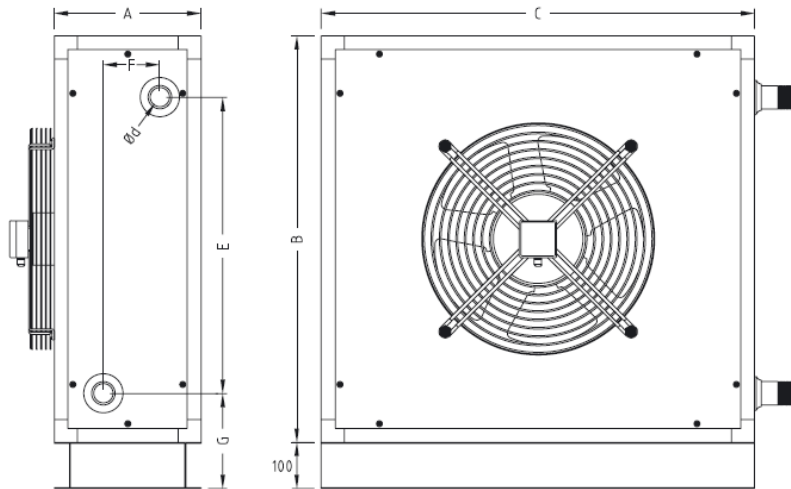
TP 40-180



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una planta de energía solar térmica para un polideportivo en el entorno climático de Madrid

### 9.2.7 Documentación técnica del disipador de energía



Código	Modelo	A	B	C	Ød	E	F	G	Motor (230V II)	Nº ventiladores
SO13029	BD 72	317	1013	1135	1" 1/2	786	68	216	330 W	1
SO13030	BD 80	317	1065	1165	1" 1/2	824	68	216	500 W	1
SO13031	BD 96	317	1085	1205	1" 1/2	862	68	216	560 W	1
SO13032	BD 112	317	1165	1290	2"	926	68	222	2x420 W	2
SO13033	BD 120	317	1200	1325	2"	964	68	222	2x500 W	2
SO13034	BD 144	317	1240	1385	2"	1002	68	222	2x550 W	2